

# Planches comparatives avec bitumes modifiés et ajouts

Rapport final

Vergleichsstrecken mit polymermodifizierten Bindemitteln und  
Zusätzen

Schlussbericht

*Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)  
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)*

*Département des Transports, de l'Équipement et de l'Environnement  
Service des Routes et des Cours d'eau, Section Routes nationales Valais romand, Sion*

*Institut für Materialprüfung  
Oberbuchsitzen*

*A.-G. Dumont, professeur  
B. Schwery, chef de section  
Dr Ch. Angst*

Coproduit par:

Office fédéral des routes (OFROU)

SRCE - Section Routes nationales, Valais romand

Septembre 2002

# TABLE DES MATIERES

<b>CHAPITRE 1 GÉNÉRALITÉS.....</b>	<b>7</b>
<b>CHAPITRE 2 INTRODUCTION.....</b>	<b>7</b>
<b>CHAPITRE 3 OBJECTIFS DU PROJET.....</b>	<b>8</b>
<b>CHAPITRE 4 LES PLANCHES COMPARATIVES .....</b>	<b>9</b>
4.1    la superstructure .....	9
4.2    la couche de roulement .....	10
4.3    les liants .....	11
4.4    publications et rapports .....	11
<b>CHAPITRE 5 LES CONTRÔLES DE PRODUCTION ET DE MISE EN OEUVRE .....</b>	<b>12</b>
5.1    procédure d'exécution.....	12
5.2    contrôles de fabrication des enrobés .....	12
5.3    contrôle à la mise en oeuvre.....	12
<b>CHAPITRE 6 LE SUIVI DES PLANCHES COMPARATIVES .....</b>	<b>13</b>
6.1    introduction.....	13
6.2    suivi du comportement in situ .....	14
6.2.1    relevés visuels des dégradations de surface (indice $I_1$ ) .....	14
6.2.2    relevés de la planéité longitudinale (indice $I_2$ ) .....	17
6.2.3    relevés de la planéité transversale (indice $I_3$ ) .....	17
6.3    synthèse des relevés permanents .....	17
6.3.1    charge du trafic.....	17
6.3.2    solllicitations climatiques.....	18
<b>CHAPITRE 7 LE COMPORTEMENT DES PLANCHES COMPARATIVES .....</b>	<b>19</b>
7.1    Résultats de l'indice $I_1$ .....	19
7.1.1    analyse de l'évolution de la fissuration .....	22
7.2    Résultats de l'indice $I_2$ .....	25
7.3    Résultats de l'indice $I_3$ .....	26
7.4    calcul de l'indice global GI.....	28
7.5    Estimation de la duree de vie des couches de roulement .....	29
7.5.1    introduction .....	29
7.5.2    modèles existants .....	30
7.6    application du modèle paris aux planches comparatives.....	30
7.6.1    introduction .....	30

7.6.2	conversion du I <sub>1</sub> suisse en Cracking index CI.....	31
7.6.3	détermination d'un seuil d'intervention .....	35
7.7	bilan du comportement .....	37
7.8	considérations sur le comportement.....	38
<b>CHAPITRE 8 ASPECTS PRÉDICTIFS DES ESSAIS DE LABORATOIRE .....</b>		<b>39</b>
8.1	Démarche de l'analyse.....	39
8.2	essais sur les liants.....	40
8.2.1	résultats .....	41
8.2.2	synthèse des corrélations significatives sur les liants.....	41
8.3	essais sur les enrobés .....	43
8.3.1	résultats des essais.....	44
8.3.2	synthèse des corrélations significatives sur les enrobés .....	44
<b>CHAPITRE 9 BILAN ECONOMIQUE .....</b>		<b>46</b>
9.1	introduction et limites de l'étude.....	46
9.2	Bilan économique .....	46
9.3	Considérations sur l'aspect économique.....	48
<b>CHAPITRE 10 ETUDE SUR LE VIEILLISSEMENT ACCELERÉ EN LABORATOIRE .....</b>		<b>49</b>
10.1	résultats des essais physiques .....	51
10.1.1	Pénétration .....	51
10.1.2	Anneau et Bille .....	53
10.1.3	Point de rupture Fraass .....	55
10.1.4	Recouvrance élastique .....	57
10.1.5	Bending Beam Rheometer .....	59
10.1.6	Force – Ductilité.....	64
10.2	caractérisation chimique du vieillissement des bitumes et bitumes polymères par IRTF .....	66
10.2.1	Généralités .....	66
10.2.2	Analyse des résultats.....	68
10.2.3	Etude du vieillissement.....	70
10.2.4	Conclusions.....	72
<b>CHAPITRE 11 ETUDE APPROFONDIE THERMOMECHANIQUE DES ENROBÉS .....</b>		<b>74</b>
11.1	introduction .....	74
11.2	présentation de l'essai de retrait thermique empêché .....	74
11.3	resultats type de l'essai et références previsionnelles .....	76
11.4	analyse des resultats des planches comparatives .....	77
11.4.1	année de transition de la fissuration versus la température de transtion de l'essai de retrait thermique empêché.....	77
11.4.2	indice de fissuration à 10 ans versus la température de transtion de l'essai de retrait thermique empêché.....	78
11.5	considérations sur les aspects thermomecaniques.....	79
<b>CHAPITRE 12 CONCLUSIONS GÉNÉRALES .....</b>		<b>80</b>

## RESUME

Les liants modifiés ont fait leur apparition à grande échelle il y a une trentaine d'années afin d'accroître les performances mécaniques des revêtements bitumineux. Ce développement répondait à l'accroissement du trafic d'une part, mais aussi à une volonté de réduire les périodes de maintenance qui sont source de gêne pour le trafic et qui directement ou indirectement occasionnent des coûts supplémentaires à la société.

A la fin des années 80, le Service des Routes Nationales de l'Etat du Valais et le Laboratoire des Voies de Circulation de l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) ont participé à l'élaboration des recommandations suisses concernant les bitumes modifiés aux polymères. Cependant, peu d'informations issues de l'expérience étaient alors à disposition, malgré l'utilisation de ces produits depuis de nombreuses années. En 1988, le Service des Routes Nationales du Valais réalisait la superstructure et le revêtement de l'autoroute N9 sur une distance de 15 km. Une section fût mise à disposition pour réaliser des planches d'essais en vue de comparer le comportement d'enrobés aux bitumes modifiés aux polymères et ajouts en regard de celui d'enrobés aux bitumes purs. Un vaste champ d'observation présentant des conditions identiques était donc disponible pour la construction d'un lot de 16 planches d'essais d'une longueur de 300 mètres chacune. Douze bitumes modifiés ainsi que quatre bitumes purs pris comme référence ont été sélectionnés pour la fabrication de la couche d'usure. Dans le but de suivre l'évolution de comportement à long terme, des auscultations systématiques, ainsi que des prélèvements d'échantillon et leur analyse ont été échelonnées sur une période de 10 ans. Le suivi du comportement à long terme des planches a permis d'évaluer l'intérêt économique à vouloir utiliser un liant modifié dans un enrobé pour une couche de roulement par rapport à un bitume pur. Les investigations réalisées sur les composants et les enrobés ont eu pour objectif de mettre en évidence les paramètres ayant une relation avec le comportement des couches de roulement et par conséquent les essais ayant un caractère prédictif de l'évolution des dégradations. Deux études complémentaires, l'une portant sur le vieillissement accéléré du liant en laboratoire et l'autre sur le comportement thermomécanique des enrobés viennent compléter cette recherche.

## ZUSAMMENFASSUNG

Modifizierte Bindemittel werden seit etwa dreißig Jahren in grösserem Rahmen benutzt, um die mechanische Leistungsfähigkeit der Bitumenbeläge zu steigern. Diese Entwicklung entsprach einerseits der Zunahme des Verkehrs, andererseits aber auch dem Willen, die Unterhaltsintervalle, welche stets ein Verkehrshindernis darstellen und direkt oder indirekt zusätzliche Kosten für die Gesellschaft entstehen lassen, zu reduzieren.

Ende der achtziger Jahre haben das Walliser Amt für Nationalstrassen und das Labor für Verkehrswege (LAVOC) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) an der Ausarbeitung der Schweizer Empfehlungen für polymermodifizierte Bitumen mitgearbeitet. Trotz langjährigem Einsatz solcher Produkte standen wenig Erfahrungswerte aus der Praxis zur Verfügung. Im Jahre 1988 baute das Walliser Amt für Nationalstrassen auf 15 km der Autobahn N9 Oberbau und Belag ein. Ein Teilstück wurde zur Verfügung gestellt, um Versuchs Bretter zu verwirklichen, um das Verhalten von (mit Polymeren oder anderen Zusätzen) modifizierten Bitumen-Mischgute mit demjenigen reiner Bitumen-Mischgute zu vergleichen. Dadurch bot sich die Möglichkeit, 16 Versuchs Bretter von je 300 Metern Länge unter identischen Bedingungen zu untersuchen. Zwölf modifizierte Bitumen, sowie vier reine Bitumen zum Vergleich, wurden für die Herstellung der Deckschicht ausgewählt. Um die langfristige Verhaltensentwicklung zu verfolgen sind während 10 Jahren systematisch messtechnische Zustandserfassungen sowie Probeentnahmen und deren Analyse durchgeführt worden. Die Beobachtung des Langzeitverhaltens der Versuchs Bretter hat es erlaubt, das wirtschaftliche Interesse der Benützung eines modifizierten Bindemittels gegenüber eines reinen Bitumens für die Deckschicht abzuschätzen. Die auf den Bestandteilen und Mischguten verwirklichten Nachforschungen sollten die verhaltensbezogenen Parameter der Deckschichten hervorheben und damit die Laborversuche, welche eine Einschätzung der zukünftigen Schadensentwicklung erlauben. Zwei zusätzliche Studien vervollständigen diese Forschungsarbeit; die eine befasst sich mit der beschleunigten Alterung des Bindemittels im Labor und die andere mit dem thermomechanischen Verhalten von Mischguten.

## ABSTRACT

Modified binders began to be used extensively about thirty years ago with the aim of improving the mechanical performance of bituminous pavements. This development came in response to traffic increase, on the one hand, but also in order to decrease maintenance periods, which are a major source of traffic disturbance and which, directly or indirectly, lead to additional costs which must be borne by society.

At the end of the 1980's, the Highways Department of the Canton of Valais and the Laboratory for Traffic Facilities (LAVOC) at the Swiss Federal Institute of Technology (EPFL) participated in the preparation of Swiss recommendations concerning polymer modified binders. However, limited information based on experience was available at that time in spite of the use of such products for many years. In 1998, the National Roadway Service of the Canton of Valais constructed the superstructure and the pavement of the N9 motorway over a distance of 15 km. One stretch was made available for the execution of test sections in order to compare the behaviour of polymer and additive modified bituminous mixes with that of pure bituminous mixes. A large observation field with identical conditions was made available for the construction of 16 different test sections, each 300 m long. Twelve modified and four pure bitumens, as references, were selected for the construction of the wearing course. With the aim of following the evolution of long-term behaviour, systematic measurements, as well as sampling and analyses, were scheduled over a period of 10 years. The observation of the long-term behaviour of these test sections has enabled the evaluation of the economic viability of using modified binders rather than pure bitumen in the mix for the wearing course. The investigations carried out concerning the components and the mixes were aimed at studying the parameters which determine the behaviour of the wearing courses and, therefore, the tests served to predict the evolution of degradation. Two additional studies, one concerning accelerated ageing of the binder in the laboratory and the other looking at the thermomechanical behaviour of binders, complete this research project.

## CHAPITRE 1 GENERALITES

Les liants modifiés ont fait leur apparition à grande échelle il y a une vingtaine d'année. Ces matériaux étaient destinés à accroître la résistance des revêtements bitumineux pour faire face à l'accroissement des sollicitations générées par le trafic d'une part, mais aussi pour réduire les périodes de maintenance qui sont source de gêne pour le trafic et qui, directement ou indirectement, occasionnent des coûts supplémentaires à la société. Un suivi à long terme d'un lot de 16 planches comparatives en Valais a permis de réaliser une évaluation technique et économique de l'emploi de bitumes modifiés aux polymères, retenus dans la formulation des enrobés des couches de roulement, par rapport à l'emploi de bitumes purs.

## CHAPITRE 2 INTRODUCTION

A la fin des années 80, la sous-commission 271/15 de la VSS, sous la présidence du Dr C. Angst, a élaboré les premières recommandations suisses concernant les bitumes modifiés aux polymères. Cependant, peu d'informations tirées de l'expérience étaient alors à disposition malgré l'utilisation de nombreux produits depuis de nombreuses années. En 1988, le canton du Valais réalisait la superstructure et le revêtement de l'autoroute N9 sur une distance de 15 kilomètres. Sous l'impulsion du Service des Routes Nationales de l'Etat du Valais et de l'Office Fédéral des Routes (OFROU), le lot 342 entre Ardon et Vétroz se situant à l'ouest de Sion fut mis à disposition pour réaliser une étude comparative de revêtements avec bitumes modifiés et ceux avec bitumes purs. Monsieur Bernard Schwery, ingénieur adjoint au SRN, membre de la sous-commission 271/15 et responsable de la direction des travaux du lot 342 pris en charge la responsabilité de l'exécution des différentes planches. Le Laboratoire de Voies de Circulation (LAVOC), sous la direction du professeur André-Gilles Dumont, fut chargé de la conception du projet, de l'organisation des contrôles d'exécution et du suivi des planches.

Un vaste champ d'observation uniforme était donc mis à disposition pour la réalisation de 16 planches d'essais longues chacune de 300 mètres. Les 16 planches sont strictement identiques par :

La constitution des couches de fondation en grave et des couches de support en béton bitumineux

Les conditions et les dates de mise en œuvre

Les conditions climatiques identiques

Les charges de trafic

Douze bitumes modifiés ainsi que quatre bitumes purs pris comme référence ont été sélectionnés pour la fabrication de la couche de roulement. Le détail concernant les liants retenus figure au tableau 3.

Les partenaires du projet sont :

Département des Transports, de l'Équipement et de l'Environnement – DTEE :  
Service des Routes et des Cours d'eau, Section Routes nationales Valais romand, Sion  
Bernard Schwery, ing. EPF  
Stéphane Aebersold, ing. EPF

Laboratoire des voies de circulation de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne :  
Prof. André-Gilles Dumont  
Monique Huet  
Jean-Claude Turtschy, ing. EPF  
Dr Thierry Pucci, ing. EPF  
Eric Simond, ing. EPF  
Christophe Rohr, ing. ETS  
Michel Pittet, collaborateur technique

IMP, Institut für Materialprüfung, Oberbuchsitzen  
Dr Christian Angst, ing. EPF

Ont également pris part aux essais, mesures et interprétations:

EMPA, VIAGROUP S.A., ERTEC S.A., STIA et le Dr Claude Grimm

Le financement a été assuré par la Confédération et le canton du Valais dans le cadre de la réalisation des routes nationales.

## CHAPITRE 3 OBJECTIFS DU PROJET

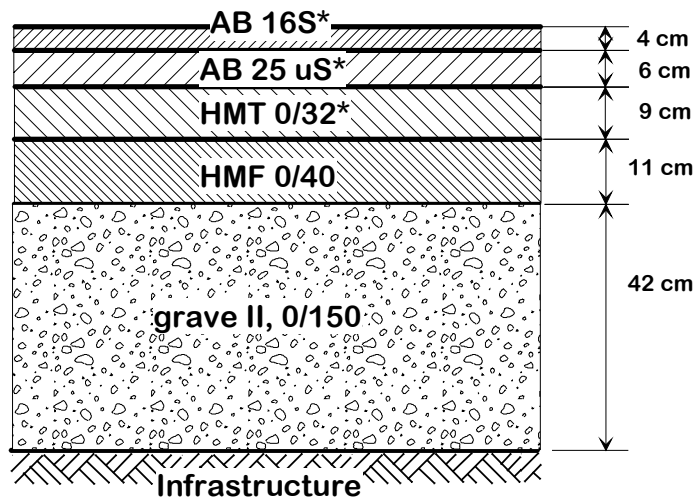
Dans le but de suivre l'évolution du comportement à long terme de ces sections, des auscultations systématiques échelonnées sur une période de dix ans ont été agendées. Ces investigations comprenaient les relevés des conditions climatiques, du volume de trafic et des suivis du comportement in situ (dégradations, planéité de surface...), ainsi que des prélèvements d'échantillons in situ dans le but de suivre l'évolution des caractéristiques des matériaux dans le temps. Les 3 principaux objectifs de cette recherche sont les suivants:

- A moyen et à long terme, le comportement d'un bitume modifié est-il meilleur que celui d'un liant classique ?
- Le gain de performance est-il en rapport avec le coût engendré par l'utilisation du liant comportant des polymères ?
- Quels sont les caractéristiques du liant ou de l'enrobé qui permettent une évaluation et une prévision des performances...
  - ...d'une part sur les essais traditionnels,
  - et d'autre part, sur les nouveaux essais commercialisés récemment ?

## CHAPITRE 4 LES PLANCHES COMPARATIVES

### 4.1 LA SUPERSTRUCTURE

La chaussée a été dimensionnée à l'aide de l'ancienne norme suisse (1) sur la base d'une durée de vie de 20 ans en prenant en considération un trafic pondéral équivalent journalier déterminant de 1600 essieux standards avec une augmentation annuelle du trafic de 5 %. Le schéma de la superstructure ainsi que la description des caractéristiques des différentes couches sont résumés à la Figure 1 et au Tableau 1 :



\* ouverture des passoires selon l'ancienne norme SN 640 431 (de 1976)

Figure 1 : Schéma de la superstructure des planches comparatives

Matériaux	Epaisseur (cm)	Type de liant	Teneur en liant sur granulats (%)
Enrobés hydrocarbonés AB16S	4	c.f Tableau 3	5,6
Enrobés hydrocarbonés AB25uS	6	80/100 + 3% de poudre Trinidad 50/50	4,8
Enrobé HMT B 32	9	60/70	4
Enrobé HMF 0/40	11	80/100	3,5
Grave II	42	-	-

Tableau 1 : Caractéristiques des couches de la superstructure

Les enrobés de type S sont caractérisés par un liant dur, une faible teneur en liant et la prédominance de gravier concassé. Ce type fournit une haute stabilité aux déformations permanentes dues aux sollicitations de trafic sévères : classe T4 ou T5 (1).

Le profil transversal de la chaussée est de 2x2 voies circulables et voies d'arrêt d'urgence. Par sens, les dimensions sont de 3.75 m par voie et 2.50 pour la voie d'arrêt d'urgence. L'utilisation d'une finisseuse à large table a été retenue pour la pose des couches d'enrobés sur la largeur totale des voies circulables, soit 7.50 m par sens. Une petite finisseuse de 2.50 m de large a posé les enrobés sur la voie d'arrêt d'urgence. Cette configuration assure une bonne exactitude des niveaux et sans joint longitudinal entre la voie normale et la voie de dépassement rapide.

## 4.2 LA COUCHE DE ROULEMENT

La couche d'usure en enrobé AB 16S des 16 planches a été réalisée selon la norme en vigueur en 1988 (2). Les caractéristiques principales de la fraction granulaire du mélange sont résumées au tableau ci-dessous :

Fraction granulométrique * (mm)	Los Angeles (%)	PSV	% de non cubique
10/16	14	56	35,6
6/10	16		41,5
3/6	18		33,5
0/3			32,5

Tableau 2 : Caractéristiques des granulats des planches comparatives

\* Selon la norme SN 670 710 b (2) en vigueur en 1988

Le filler est issu de récupération, il remplit les exigences de l'ancienne norme SN 670 760 (3).

Sur la base de l'étude de formulation, les valeurs suivantes ont été proposées:

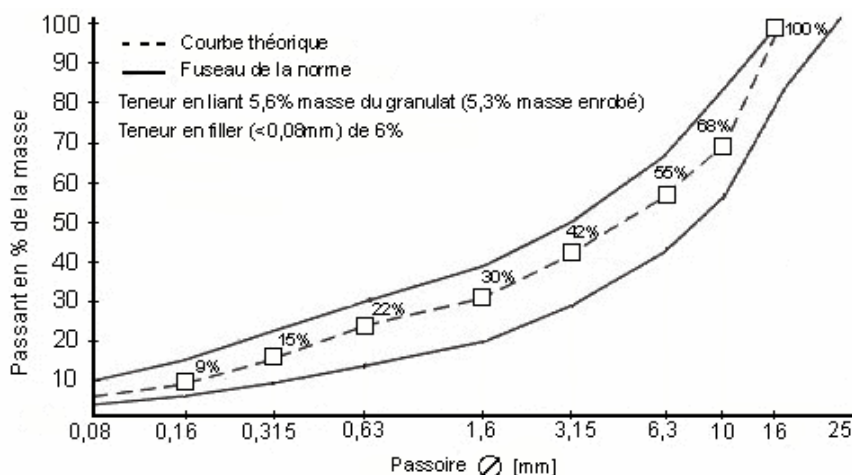


Figure 2: Formulation de l'enrobé de la couche de roulement AB 16 S

Il convient de mentionner que le dosage en liant proposé a été soumis aux divers fournisseurs de liant, en leur offrant la possibilité, si besoin était, de l'adapter aux propriétés des liants d'ajout proposés. Relevons qu'aucun fournisseur n'a utilisé cette possibilité offerte et que par

conséquent, tous les enrobés AB 16 mis en œuvre sur les planches d'essai ont le même teneur en liant.

## 4.3 LES LIANTS

Planche n°	Bitume de base	Type de polymère		Classement par type de bitume
		Bitume prêt à l'emploi	Ajout pulvérulent	
1	B 80/100 semi-soufflé + dope			classique
2	B 60/70 semi-soufflé + dope			classique
3	B 80/100 distillation directe	S.B.S. 3%		modifié
4	B 40/50 distillation directe	S.B.S. 3%		modifié
5	B 80/100 distillation directe	S.B.S. 5%		modifié
6	B 40/50 distillation directe	S.B.S. 5%		modifié
7	B 80/100 distillation directe	polyoléfine 6%		modifié
8	B 60/70 distillation directe	(polyisobutylène +E.V.A) 11,5%		modifié
9	B 60/70 + agent oxydant	E.P.D.M. 4%		modifié
10	B 80/100 semi-soufflé		polyoléfine 7%	ajouts
11	B 80/100 distillation directe	S.B.S. 3%		modifié
12	B 80/100 semi-soufflé		(S.B.S. + E.V.A. + agents) 4%	ajouts
13	B 80/100 semi-soufflé		(asphalte naturel + filler) 3,6%	ajouts
14	B 80/100 semi-soufflé en 2 étapes +B200	E.P.D.M. 5%		modifié
15	B 80/100 distillation directe			classique
16	B 60/70 distillation directe			classique

Tableau 3: Type de liants utilisés

## 4.4 PUBLICATIONS ET RAPPORTS

Les planches comparatives ont fait l'objet de nombreuses publications au niveau européens et nationales :

- Congrès Eurobitume (European Bitumen Association) (14) (15) (16)
- Revue "Route et Trafic" de l'Union des professionnelles suisses de la route (17) (26)
- Rapport OFR "*Planches comparatives avec bitumes modifiés et ajouts*" (Office Fédéral des Routes) (13)

- Journée technique du LAVOC (19)

La liste des rapports rédigés dans le cadre de ce projet se trouve en annexe n°1.

## CHAPITRE 5 LES CONTRÔLES DE PRODUCTION ET DE MISE EN OEUVRE

### 5.1 PROCÉDURE D'EXÉCUTION

Toutes les planches ont été réalisées durant la période du 22 août au 1er septembre 1988. La fabrication des enrobés a été faite dans un seul poste et la pose du revêtement a été réalisée par une seule entreprise, avec le même équipement.

### 5.2 CONTRÔLES DE FABRICATION DES ENROBÉS

Les contrôles de fabrication de l'enrobé pour la couche d'usure ont porté sur la granulométrie, la teneur en liant ainsi que la teneur en vides Marshall. Les résultats montrent que:

- la teneur en liant sur enrobé se situe dans la fourchette des valeurs admissibles. Seule la planche 12 présentent un excès de 0,5% par rapport à la moyenne de 5,35%,
- la teneur en vide à l'essai Marshall est de 5,1% en moyenne. Les planches 1 et 9, avec respectivement 6.2 % et 6.3 %, présentent un écart supérieur aux exigences fixées par la norme (4).

### 5.3 CONTRÔLE À LA MISE EN OEUVRE

Les contrôles de mise en œuvre ont porté sur sa conformité au sens de la norme SN 640 431a (5). Les contrôles effectués ne sont pas tous mentionnés dans ce rapport. Les principaux résultats sont les suivants:

- épaisseur de la couche: l'épaisseur moyenne se situe dans la fourchette des valeurs admissible sauf pour les planches 9, 11, 14, 15 et 16 qui n'ont qu'une épaisseur moyenne de 35mm,
- teneur en vides: la moyenne est conforme aux exigences sauf pour les planches 2, 5, 14 et 15 qui dépassent la valeur limite de 6%, avec respectivement 7,05% 6,40% 6,33% et 6,40%,
- degré de compactage: le degré de compactage minimal de 98% requis est atteint sur toutes les planches.

## CHAPITRE 6 LE SUIVI DES PLANCHES COMPARATIVES

### 6.1 INTRODUCTION

Les planches comparatives ont été suivies sur une période de 10 ans après leur mise en service en 1988. L'organigramme suivant résume la chronologie des essais et des relevés des dégradations :

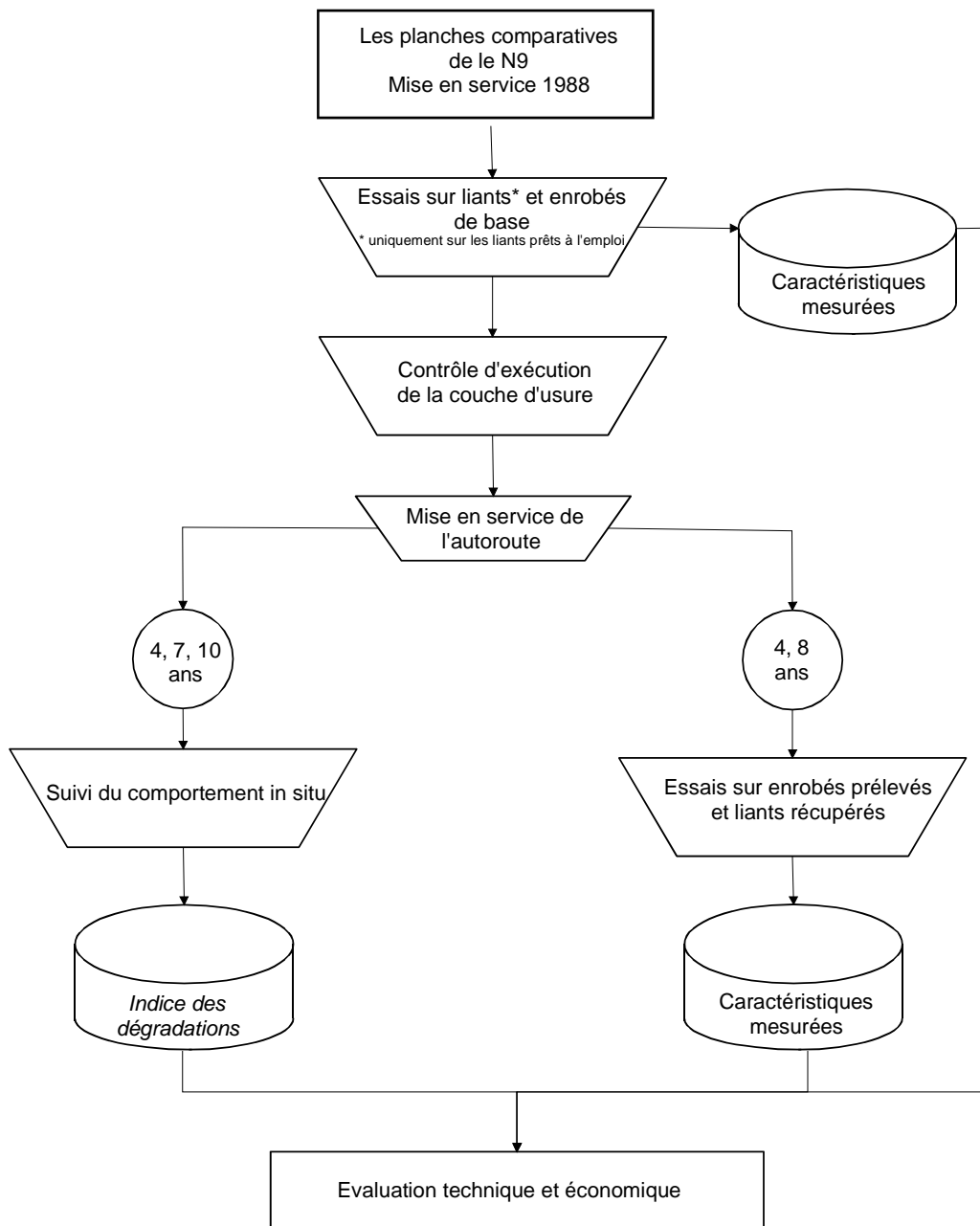


Figure 3: Chronologie des essais et des relevés des dégradations

## 6.2 SUIVI DU COMPORTEMENT IN SITU

Dans le but de suivre l'évolution des planches comparatives à long terme, des relevés et mesures d'état in situ ont été entrepris à intervalles réguliers à 4, 7 et 10 ans. Ces auscultations ont consistés en des relevés visuels détaillés de l'état de surface, des relevés de planéité longitudinale et transversale et des mesures d'adhérence et de portance. Chacune de ces caractéristiques est évaluée séparément par un indice I figurant dans la norme SN 640 925 (6) remplacée, aujourd'hui, par la nouvelle norme SN 640 925a (7).

Le Tableau 4 donne la liste nominative des indices et la chronologie des relevés effectués:

Relevés et indices d'état	Mise en service	4 ans	7 ans	10 ans
Relevé visuel des dégradations de surface I1		X	X	X
Relevé de la planéité longitudinale I2	X	X		X*
Relevé de la planéité transversale I3	X	X		X
Relevé de la qualité antidérapante I4	X	X		X
Relevé de la portance I5	X	X		

\* relevé réalisé à 8 ans

Tableau 4: Relevés et mesure d'état effectués

### 6.2.1 RELEVÉS VISUELS DES DÉGRADATIONS DE SURFACE (INDICE I<sub>1</sub>)

A 4, 7 et 10 ans après la mise en service de la N9, trois relevés visuels détaillés ainsi que des relevés au cadre des fissures ont été entrepris. Il est important de noter que ces relevés ont été effectués par la même personne pour permettre d'assurer au mieux une constance des critères d'appréciation.

Parmi les types de dégradation proposés par le catalogue des dégradations, seuls trois ont été retenus, à savoir par ordre d'importance des dégradations rencontrées:

- la fissuration
- la perte de matériaux
- le polissage

Conformément à la norme, les dégradations de surface sont appréciées par leur étendue **A** (note 0 à 3) et par leur gravité **S** (note 0 à 3). Le détail des notes employées est donné dans les tableaux suivants :

Note	Etendue A	% du tronçon concerné
0	aucune dégradation	0
1	très localisées	< 10%
2	localisées à étendues	10..50%
3	très étendues	> 50%

Tableau 5: Echelle de la note d'étendue des dégradations A

Note	Gravité des dégradations S
0	pas de dégradations
1	légères
2	moyennes
3	graves

Tableau 6: Echelle de la note de gravité des dégradations S

Le calcul de l'indice  $I_1$ , selon l'ancienne norme SN 640 925 (6), s'effectue par la prise en compte simultanée de la note d'étendue et de gravité au moyen des valeurs de la matrice **M** (Tableau 7) et d'un facteur de pondération **G** (Tableau 8) qui tient compte de l'effort nécessaire à l'élimination de la dégradation.

$M = S \cdot A$	A=0	A=1	A=2	A=3
S=1	0	1	2	3
S=2	0	2	4	6
S=3	0	3	6	9

Tableau 7: Matrice d'évaluation M

Types de dégradations	Pondération $G$
dégradations de surface (glissance et perte de matériaux)	2
déformations	3
fissures	4
réparations	1

Tableau 8: Facteur de pondération  $G_i$  pour les revêtements hydrocarbonés (6)

Le détail du calcul de l'indice  $I_1$  est :

- pour  $\sum(G.M) \leq 50$  :  $I_1 = 5 - ((\sum G.M) / 10)$
- pour  $\sum(G.M) \geq 50$  :  $I_1 = 0$

Les points suivants, i à iv, décrivent les critères retenus pour l'appréciation des paramètres d'état ainsi pris en compte dans le calcul de l'indice  $I_1$ .

### 6.2.1.1 fissuration de surface

Selon la norme, la note 3 est attribuée à une largeur de fissuration supérieure à 10 mm, la note 2 à des largeurs de fissures comprises entre 2 et 10 mm et la note 1 pour les fissures de moins de 2 mm de large. Dans le cadre des planches comparatives, les fissures étant dans l'ensemble de largeur inférieure à 2 mm, une échelle intermédiaire de la note de gravité a été introduite (Tableau 9).

Note de gravité S	Type de fissures
0.125	amorces de fissures
0.25	petites fissures isolées
0.75	petites fissures légèrement ramifiées
1	petites fissures de ramification dense

Tableau 9: Echelle d'appréciation de la gravité des fissures

### 6.2.1.2 perte des matériaux

L'évaluation de la gravité de la perte des matériaux a été faite à travers un calcul semi-quantitative prenant en compte le calibre maximal des grains arrachés à savoir du sable, des petits gravillons (3/6), des gravillons moyens (6/10) et des gros gravillons (10/16) ainsi qu'un appréciation de la fréquence de ces arrachements. Les poids retenus sont:

Poids	Calibre maximal des grains arrachés
0.5	sable (0/3)
1	petits gravillons (3/6)
2	gravillons moyens (6/10)
3	gros gravillons (10/16)

Poids	Fréquence des arrachements
0.5	Très faible
1	faible
2	moyenne

Le produit de ces deux poids divisé par 10 donne le note de gravité S.

A 10 ans, les planches présentent une gravité comprise dans un intervalle de 0,3 à 1,1. L'étendue A a été fixée à 1 pour l'ensemble des planches (soit moins de 10% de la surface)

### 6.2.1.3 polissage

Sur toutes les planches relevées à 4, 7 et 10 ans, on constate un léger polissage uniforme et constant dans les traces des roues. La note de gravité de 1/3 et la note d'étendue 3 ont été retenues pour l'ensemble des observations.

## 6.2.2 RELEVÉS DE LA PLANÉITÉ LONGITUDINALE (INDICE $I_2$ )

L'uni longitudinal a été mesuré à l'aide de l'appareil ARAN qui fournit un indice de confort de roulement RCI (Riding Comfort Index) sur une échelle de 0 (très mauvais) à 5 (très bon). Une valeur RCI de 4 correspond à peu près aux exigences de la norme pour les nouvelles constructions (écart-type mesuré au goniographe compris entre 1.8 et 2.2), et aussi à la valeur 4 dans l'échelle d'évaluation de  $I_2$ . La correspondance entre le RCI et l'indice  $I_2$  est donc directe.

## 6.2.3 RELEVÉS DE LA PLANÉITÉ TRANSVERSALE (INDICE $I_3$ )

La planéité transversale a été mesurée à l'aide d'un transverso-profilographe qui fournit les profondeurs d'ornièrre T.

# 6.3 SYNTHÈSE DES RELEVÉS PERMANENTS

## 6.3.1 CHARGE DU TRAFIC

Une station de mesure située à Ardon a relevé en permanence le trafic pour les deux voies et dans les deux sens, soit dans le sens Lausanne-Sion et Sion-Lausanne. Les mesures permettent de différencier les véhicules d'une longueur supérieure à 8 mètres. Ces véhicules appartiennent à la catégorie du trafic des poids lourds. Notons que certains camions à 2 ou 3 essieux ont des longueurs inférieures à 8 mètres, il faut donc mentionner que ces comptages sous-estiment la charge réelle du trafic des poids lourds. Mais en l'absence de valeurs précises, on admet ces mesures comme étant représentative de l'évolution du trafic poids lourds sur la période de suivi des planches. Ainsi les mesures à 4 ans et à 10 ans donnent les résultats suivants :

- à 4 ans,
 

7 millions de véhicules/an répartis en moyenne à 50% par sens, dont 75% sur la voie normale et 25% sur la voie de dépassement, le trafic de la voie normale compte 20% de poids lourds.

Soit en moyenne, 7200 vhc/jours sur la voie normale dont 1400 poids lourds. Le trafic pondéral équivalent journalier moyen est donc de  $1400 \times 1,2 = 1700$  essieux standards.
- à 10 ans,
 

8,5 millions de véhicules/an répartis en moyenne à 50% par sens, dont 75% sur la voie normale et 25% sur la voie de dépassement, le trafic de la voie normale compte 18% de poids lourds.

Soit, 8700 vhc/jours sur la voie normale dont 1700 poids lourds. Le trafic pondéral équivalent journalier moyen est donc de  $1700 \times 1,2 = 2000$  essieux standards.

Les relevés à 4 et 10 ans montrent que la charge supportée par la chaussée se situe dans la catégorie de charge de trafic retenue pour le dimensionnement, soit la catégorie T5 correspondant à un trafic maximum de 3000 essieux standards.

### 6.3.2 SOLLICITATIONS CLIMATIQUES

Des mesures des sollicitations climatiques, effectuées in situ par la station de mesure de Ardon (VS), fournissent des valeurs indicatives des sollicitations auxquelles sont soumises les planches comparatives du Valais. Les indicateurs fournis par ces mesures sont l'indice de gel de l'air, les mesures de radiations, et les mesures de la température à l'intérieur de la chaussée. Ces mesures, analysées par M. Dysli, fournissent les indications suivantes :

L'indice de gel de l'air défini par la norme SN 670 140a comme étant la plus grande différence, en°C·jour, entre le maximum et le minimum de la courbe cumulative des températures moyennes journalières de l'air pendant la période de gel. Cet indice a été, pour les 4 premières années de mise en service de la chaussée, successivement de 52, 73, 109 et 127°C·jour. Lors du dimensionnement au gel d'une superstructure routière, la norme exige de prendre en considération l'indice moyen des trois hivers les plus froids sur une période de 30 ans. Cet indice déterminant est pour la région concernée de 207°C·jour. Ainsi, il apparaît que les planches comparatives n'ont pas subi de conditions hivernales difficiles durant les 4 premières années de leur mise en service.

Les mesures de radiations, effectuées au droit de la station à l'aide d'un pyranomètre et deux pyrgéomètres, montre que le bilan global des radiations est positif pour la chaussée, la température à la surface (-5 cm) étant, pour les périodes hivernales, de 2 à 5°C supérieur à la température de l'air. En annexe 2 figure le profil des températures dans la chaussée correspondant à une période de mesure comprise entre le moi de novembre 1992 et août 1993.

Les mesures de température dans la chaussée mettent en évidence des variations à la surface de l'ordre de 30°C en 16 heures, soit une variation moyenne d'environ 2°C/heure. Ces variations ont été observées au mois de mars lors du passage d'une journée chaude à une nuit froide. Il faut noter que ces périodes de transition entre l'hiver et le printemps correspondent à d'importantes variations de température journalière.

## CHAPITRE 7 LE COMPORTEMENT DES PLANCHES COMPARATIVES

### 7.1 RÉSULTATS DE L'INDICE $I_1$

Les tableaux 10,11 et 12 présentent les résultats de calcul de l'indice  $I_1$  relevé à 4, 7 et 10 ans.

		Planches															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Polissage	A	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
G = 2	S	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	MxG	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Perte de matière	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G = 2	S	0.8	1	0.45	0.35	0.6	0.45	0.35	0.3	1.1	0.6	0.7	0.4	0.8	1.3	0.9	1.1
	MXG	1.6	2	0.9	0.7	1.2	0.9	0.7	0.6	2.2	1.2	1.4	0.8	1.6	2.6	1.8	2.2
Fissures	A	1	1	1	1	1	0	1	3	3	2	0	1	2	2	1	1
G=4	S	0.125	0.25	0.125	0.25	0.25	0	0.125	0.75	1	0.25	0	0.25	0.25	0.125	0.125	0.125
	MxG	0.5	1	0.5	1	1	0	0.5	9	12	2	0	1	2	1	0.50	0.50
	Somme de MxG	4.1	5.0	3.4	3.7	4.2	2.9	3.2	5.6	8.2	4.2	3.4	3.8	4.6	5.1	4.3	4.7
$I_1 = 5 - (\text{somme de MxG}/10)$	Indice $I_1$	4.6	4.5	4.7	4.6	4.6	4.7	4.7	3.8	3.4	4.5	4.7	4.6	4.4	4.4	4.6	4.5

Tableau 10: Indice  $I_1$  à 4 ans

		Planches															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Polissage	A	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
G = 2	S	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	MxG	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Perte de matière	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G = 2	S	0.8	1	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4	0.3	1.1	0.6	0.7	0.4	0.8	1.3	0.9	1.1
	MXG	1.6	2	1	0.8	1.2	1	0.8	0.6	2.2	1.2	1.4	0.8	1.6	2.6	1.8	2.2
Fissures	A	1	2	2	2	2	1	1	3	3	2	0	2	2	1	1	1
G=4	S	0.25	0.75	0.13	0.25	0.13	0.13	0.25	0.75	1.25	0.5	0	0.5	0.25	0.25	0.13	0.25
	MxG	1	6	1	2	1	0.5	1	9	15	4	0	4	2	1	0.5	1
	Somme de MxG	4.6	10	4	4.8	4.2	3.5	3.8	11.6	19.2	7.2	3.4	6.8	5.6	5.6	4.3	5.2
$I_1 = 5 - (\text{somme de MxG}/10)$	Indice $I_1$	4.5	4.0	4.6	4.5	4.6	4.7	4.6	3.8	3.1	4.3	4.7	4.3	4.4	4.4	4.6	4.5

Tableau 11: Indice  $I_1$  à 7 ans

		Planches															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Polissage	A	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
G = 2	S	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	MxG	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Perte de matière	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G = 2	S	0.8	1	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4	0.3	1.1	0.6	0.7	0.4	0.8	1.3	0.9	1.1
	MXG	1.6	2	1	0.8	1.2	1	0.8	0.6	2.2	1.2	1.4	0.8	1.6	2.6	1.8	2.2
Fissures	A	1	3	1	3	2	1	1	3	3	3	0	3	2	2	1	2
G=4	S	0.5	0.75	0.25	0.5	0.25	0.25	0.25	1.25	2	0.75	0	0.75	0.5	0.25	0.25	0.25
	MxG	2	9	1	6	2	1	1	15	24	9	0	9	4	2	1	2
	Somme de MxG	5.6	13	4	8.6	5.2	4	3.8	17.6	28.2	12.2	3.4	11.8	7.6	6.6	4.8	6.2
I1 = 5 -(somme de MxG/10)	Indice I1	4.4	3.7	4.6	4.1	4.5	4.6	4.6	3.2	2.2	3.8	4.7	3.8	4.2	4.3	4.5	4.4

Tableau 12: Indice I<sub>1</sub> à 10 ans

Parmi ces trois paramètres d'état, les constatations suivantes sont avancées:

- Polissage:
  - ce phénomène reste faible et stable pour l'ensemble des planches
- Perte de matériaux:
  - ce phénomène reste faible, stable et constant
- Fissuration:
  - elle se présente soit sous la forme de petites fissures isolées longitudinales et/ou transversales, ou soit sous la forme de faïençage pour les cas les plus critiques. Les relevés au cadre, fournis en annexe 3, donnent une image précise de ce paramètre d'état. Après dix ans de mise en service, il faut relever que l'ouverture des fissures ne dépasse pas 2 mm, sauf sur les planches 8 et 9 où l'on a mesuré entre 2 et 10 mm.

La figure 4 résume les valeurs de la fissuration relevée:

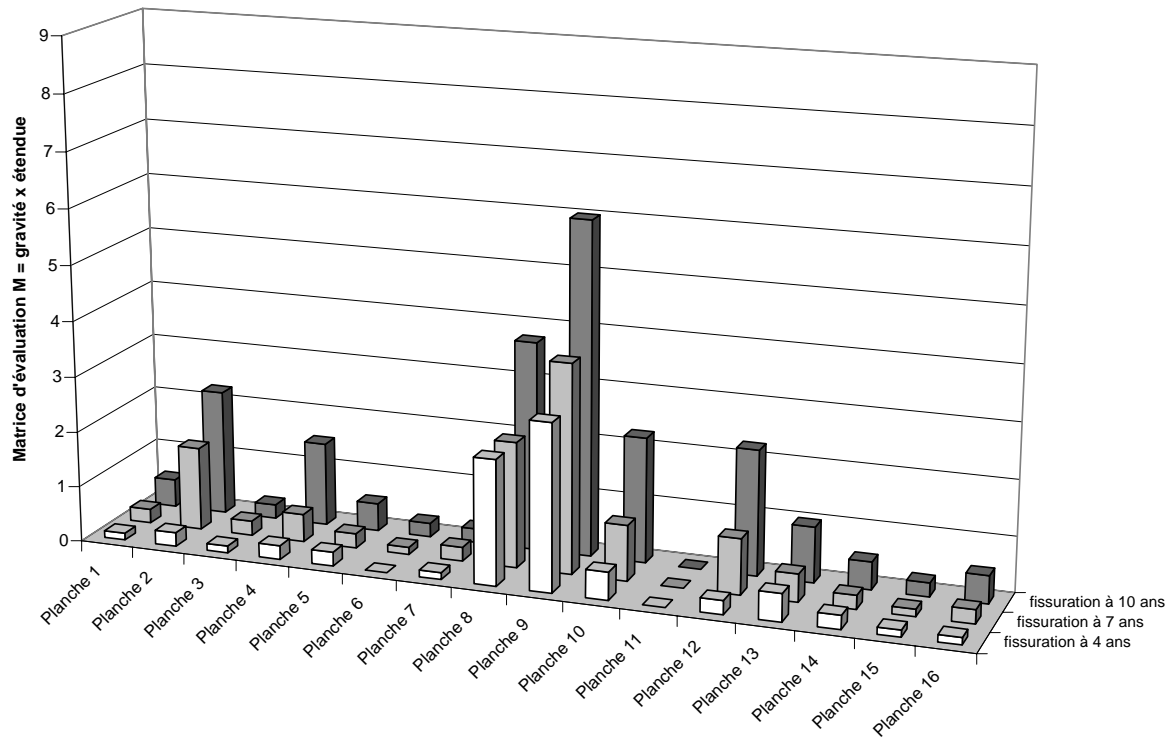


Figure 4: Fissuration à 4, 7 et 10

Un indice nommé "ampleur de la fissuration"  $I_{fiss}$  a été proposé pour évaluer l'évolution de paramètre, soit :

$$I_{fiss} = (\text{gravité} \cdot \text{étendue} / 9) \cdot 100$$

Le tableau 13 résume le calcul des indices de fissuration des planches par type de bitume :

	Ampleur de la fissuration (%)		
	4 ans	7 ans	10 ans
<b>Bitumes classiques :</b>			
planche 1	1.4	2.8	5.6
planche 2	2.8	16.7	25.0
planche 15	1.4	1.4	2.8
planche 16	1.4	2.8	5.6
<b>Bitumes avec ajouts :</b>			
planche 10	5.6	11.1	25.0
planche 12	2.8	11.1	25.0
planche 13	5.6	5.6	11.1
<b>Bitumes modifiés :</b>			
planche 3	1.4	2.8	2.8
planche 4	2.8	5.6	16.7
planche 5	2.8	2.8	5.6
planche 6	0.0	1.4	2.8
planche 7	1.4	2.8	2.8
planche 8	25.0	25.0	41.7
planche 9	33.3	41.7	66.7
planche 11	0.0	0.0	0.0
planche 14	2.8	2.8	5.6

Tableau 13: Ampleur de la fissuration à 4, 7 et 10 ans des planches comparatives

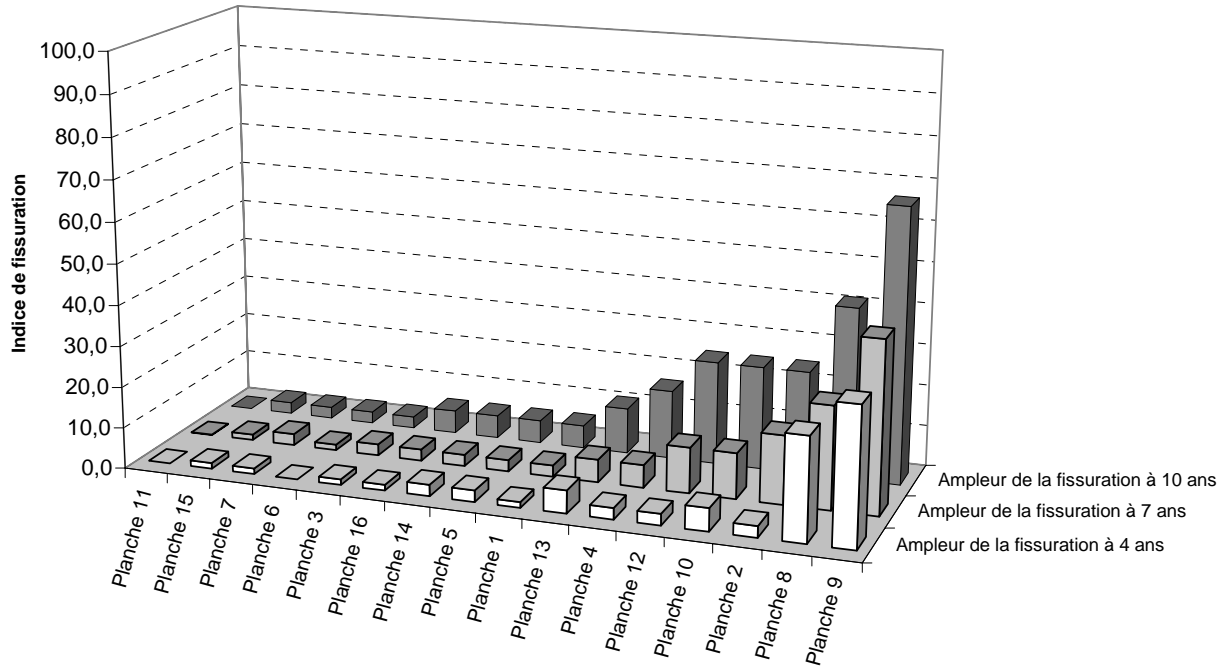


Figure 5: Classement des planches selon l'ampleur de la fissuration à 4, 7 et 10 ans

### 7.1.1 ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DE LA FISSURATION

La méthode des relevés des dégradations, introduite au chapitre 6.2.1, décrit l'indice de fissuration d'après une note d'étendue A et d'une note de gravité S. La norme suisse (7) relative aux relevés des dégradations propose une note de 3 pour une ouverture de fissures supérieure à 10 mm, la note de 2 pour des largeurs de fissures comprises entre 2 et 10 mm et la note 1 pour les fissures de moins de 2 mm de large. Dans l'ensemble, les planches comparatives ont des largeurs inférieures à 2 mm, ainsi, il a été nécessaire d'introduire une échelle plus fine de la note de gravité. Cette échelle intermédiaire se résume ainsi,

- 0,125 : amorces de fissures
- 0,25 : petites fissures isolées
- 0,75 : petites fissures légèrement ramifiées
- 1 : petites fissures de ramification dense

Admettons que de "petites" fissures isolées, localisées à étendues sur une surface de référence, sont la manifestation macrostructurale des phénomènes d'initiation des fissures à la surface de la chaussée. Par la suite, supposons que ces fissures sont en phase de propagation lorsqu'elles tendent à se ramifier. Ce postulat permet de différencier la phase d'initiation par rapport à la phase de propagation de la fissuration des planches comparatives, cela grâce à l'échelle intermédiaire de la gravité décrite ci-dessus. Fixons la valeur de l'indice de fissuration, que nous nommerons  $I_{transition}$ , qui distingue ces deux comportements, soit :

petites fissures isolées,  $S=0,25$   $\Rightarrow I_{transition} = (2-0,25)/9 = 5,6\%$

localisée à étendue,  $A = 2$   $\Rightarrow I_{transition} = \text{arrondi à } 5\%$

Observons les résultats, détaillés au Tableau 12, des relevés de la fissuration effectués à 4, 7 et 10 ans. Ceux-ci montrent que les planches qui présentent une gravité de fissuration de 0,25 sur une surface localisée à étendue, ont, au relevé suivant, une fissuration légèrement ramifiée sur une même étendue ou une étendue plus importante. Selon notre hypothèse, cette évolution s'apparente à la phase de propagation.

Déterminons pour chaque planche, l'année de transition correspondant à  $t_{\text{transition}}$ . Les planches 6 et 15 ont nécessité une extrapolation linéaire des deux derniers relevés à 7 et 10 ans afin de déterminer l'année où elles atteindront 5%, l'extrapolation donne le résultat de 15 ans. Les planches 3 et 7 présentent une fissuration négligeable et la planche 11 ne présente aucune fissuration après 10 ans de mise en service. Notons que les planches 4, 7 et 11 sont des enrobés constitués de bitumes modifiés aux polymères.

Les figures ci-dessous présentent les évolutions des indices de fissuration par types de bitume, ainsi que la distinction entre les phases d'initiation et de propagation :

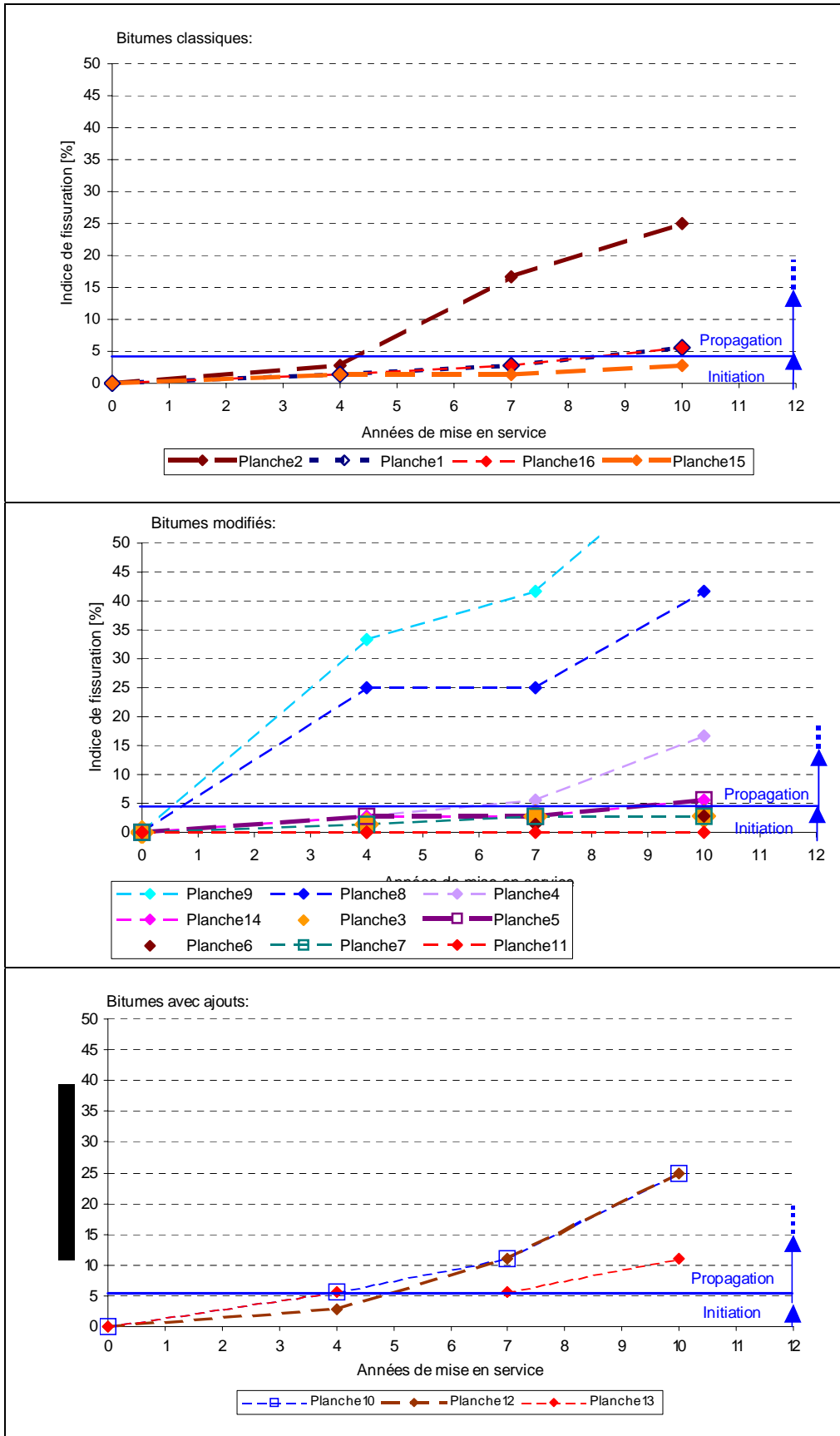


Figure 6: Evolution de l'indice de fissuration par type de bitume, planches comparatives

La situation est résumée par le tableau suivant :

Planches comparatives	Année de transition ( $I_{transition} = 5\%$ )
Bitumes classiques :	
planche 1	9
planche 2	5
planche 15	15*
planche 16	10
Bitumes modifiés :	
planche 3	**
planche 4	7
planche 5	10
planche 6	15*
planche 7	**
planche 8	1
planche 9	1
planche 11	**
planche 14	10
Bitumes avec ajouts :	
planche 10	4
planche 12	5
planche 13	7

\* extrapolation à partir de l'indice de fissuration à 7 et 10 ans

\*\* fissuration négligeable ou nulle

Tableau 14: Année de transition estimée entre la phase d'initiation et de propagation des fissures

Le tableau ci-dessus fournit les valeurs de l'année de transition qui sera utilisée dans l'analyse des résultats d'essai en laboratoire, en particulier en relation avec les essais de caractérisation des enrobés aux basses températures.

## 7.2 RÉSULTATS DE L'INDICE $I_2$

Le tableau ci-après présente les résultats obtenus:

Planche n°	Indice de planéité longitudinale $I_2$		
	à 0 ans Indice $I_2$	à 4 ans Indice $I_2$	à 8 ans Indice $I_2$
planche 1	4,0	4,1	3,9
planche 2	3,9	4,1	3,7
planche 3	3,9	3,9	3,8
planche 4	4,1	3,9	3,9
planche 5	4,1	4,1	3,8
planche 6	4,1	4,1	3,9
planche 7	4,0	4,0	4,0
planche 8	4,1	4,0	4,0
planche 9	4,1	4,0	4,0
planche 10	4,2	4,0	4,1
planche 11	4,2	4,1	4,1
planche 12	4,1	4,0	3,9
planche 13	4,1	3,7	3,9
planche 14	4,1	3,9	3,9
planche 15	4,1	3,9	3,9
planche 16	4,0	3,9	4,1

Tableau 15: Synthèse des résultats de l'indice  $I_2$

La norme SN 640 521b (8) fixe les exigences relatives à la planéité en surface des revêtements. Les valeurs de réception ainsi que les valeurs de planéité valables pendant la durée d'utilisation y sont définies. Ainsi pour les routes à grand débit (RGD), la planéité longitudinale, appréciée à travers la valeur  $sw$  mesurée au goniographe, doit être inférieure à 1,6 ‰ à la réception. Lorsque la valeur dépasse 4 ‰ des mesures doivent être prises. Cette valeur correspond à un indice  $I_2$  de 2,4.

Les relevés montrent que l'évolution est infime durant la période d'auscultation et que les valeurs à 8 ans restent largement au dessus de la limite d'intervention. La Figure 7 illustre cette situation à titre d'exemple pour la planche 14. Toutes les figures y relatives se trouvent en annexe 4.

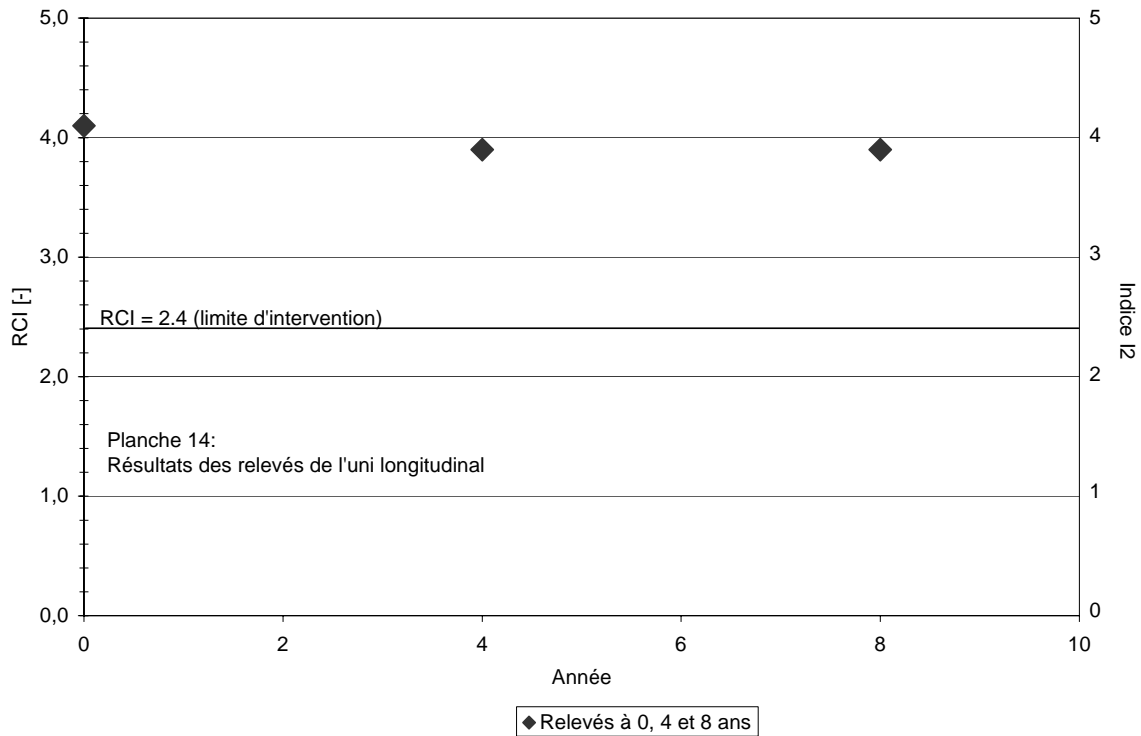


Figure 7: Résultats des relevés de l'uni longitudinal  $I_2$  – Exemple de la planche 14

### 7.3 RÉSULTATS DE L'INDICE $I_3$

Le tableau ci-après présente la moyenne de cinq mesures effectuées sur chaque planche ainsi que la correspondance avec les indices  $I_3$ , en relation avec la fig. 2 de la norme 640 925a.

Planche n°	Indice de planéité transversale $I_3$					
	à 0 ans		à 4 ans		à 10 ans	
	Profondeur T (mm)	Indice $I_3$	Profondeur T (mm)	Indice $I_3$	Profondeur T (mm)	Indice $I_3$
Planche 1	2	5,0	3	4,8	5	3,8
Planche 2	2	5,0	3	4,8	4	4,0
Planche 3	1	5,0	3	4,8	4	4,0
Planche 4	2	5,0	3	4,8	4	4,0
Planche 5	1	5,0	3	4,8	4	4,0
Planche 6	2	5,0	3	4,8	3	4,8
Planche 7	2	5,0	4	4,0	4	4,0
Planche 8	3	4,8	3	4,8	4	4,0
Planche 9	1	5,0	3	4,8	3	4,8
Planche 10	2	5,0	3	4,8	3	4,8
Planche 11	2	5,0	3	4,8	4	4,0
Planche 12	2	5,0	2	5,0	4	4,0
Planche 13	3	4,8	2	5,0	3	4,8
Planche 14	2	5,0	1	5,0	3	4,8
Planche 15	1	5,0	2	5,0	3	4,8
Planche 16	2	5,0	3	4,8	3	4,8

Tableau 16: Synthèse des résultats de l'indice  $I_3$

De même que pour l'indice  $I_2$ , la norme (8) fixe des valeurs limites pour l'indice  $I_3$ . Ainsi pour les routes à grand débit, la profondeur T de l'ornière à la réception des travaux doit être inférieure à 4 mm, ce qui équivaut à un indice  $I_3$  de 4.

On constate après 10 ans de mise en service que les planches comparatives ont des valeurs de planéité transversale excellentes, voisines de l'exigence de réception. La Figure 8 illustre cette situation.

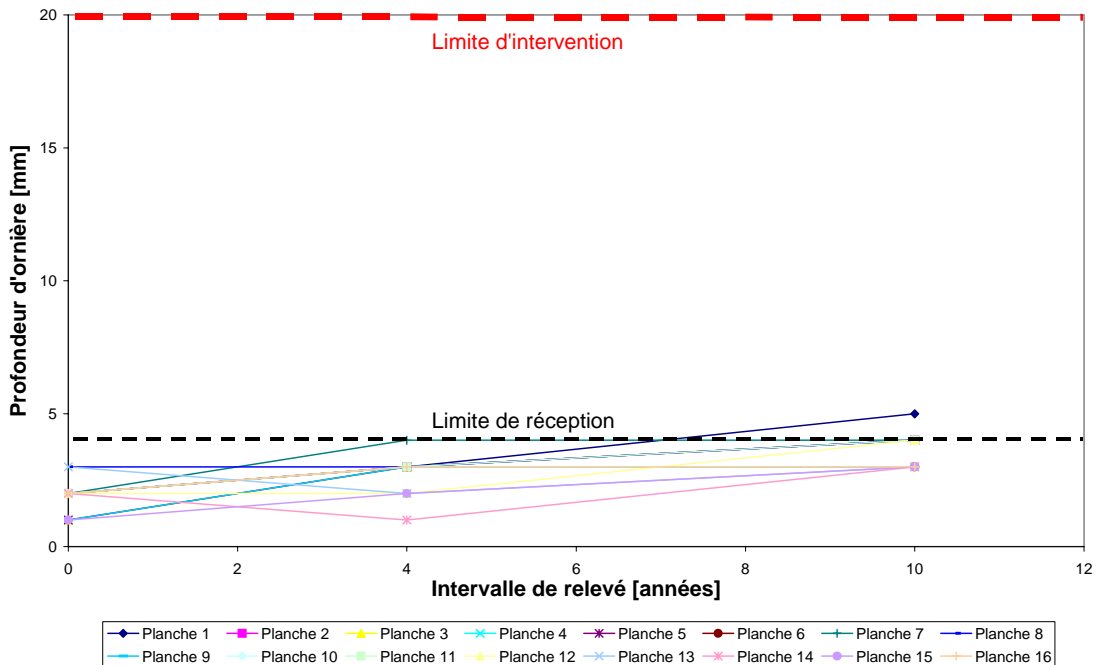


Figure 8: Relevés et tendances d'évolution de la planéité transversale  $I_3$

## 7.4 CALCUL DE L'INDICE GLOBAL GI

Selon l'ancienne norme SN 640 925 (6) un indice global **GI** de la qualité de la chaussée est défini par la relation suivante:

$$GI = 1/100(20I_1 + 45I_2 + 35I_3)$$

Au même titre que les indices individuels, **GI** est compris entre 0 (mauvais) et 5 (bon). Cet indice sert d'indicateur auxiliaire pour l'analyse du comportement à long terme des planches comparatives. Les tableaux 17 à 19 présentent les valeurs de l'indice global **GI** des planches d'essais classés par type de liant.

planche n° :	Bitumes classiques - Indice global GI		
	0 ans	4 ans	10 ans
	GI	GI	GI
Planche 1	4,6	4,4	4,0
Planche 2	4,5	4,4	3,8
Planche 15	4,6	4,4	4,3
Planche 16	4,6	4,3	4,4
<b>Moyenne</b>	<b>4,6</b>	<b>4,4</b>	<b>4,1</b>

Tableau 17: Bitumes classiques - indice global GI de 0 à 10 ans

planche n° :	Bitumes modifiés - Indice global GI		
	0 ans	4 ans	10 ans
	GI	GI	GI
Planche 3	4,5	4,3	4,0
Planche 4	4,6	4,3	3,9
Planche 5	4,6	4,4	4,0
Planche 6	4,6	4,4	4,3
Planche 7	4,6	4,1	4,1
Planche 8	4,5	4,2	3,8
Planche 9	4,6	4,1	3,9
Planche 11	4,6	4,4	4,1
Planche 14	4,6	4,4	4,3
<b>Moyenne</b>	<b>4,6</b>	<b>4,3</b>	<b>4,0</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>0,05</b>	<b>0,12</b>	<b>0,17</b>
<b>2*Ecart-type</b>	<b>0,10</b>	<b>0,23</b>	<b>0,34</b>

Tableau 18: Bitumes modifiés - Indice global GI de 0 à 10 ans

planche n°	Bitumes avec ajouts - Indice global GI		
	0 ans	4 ans	10 ans
	GI	GI	GI
Planche 10	4,6	4,4	4,2
Planche 12	4,6	4,5	3,9
Planche 13	4,5	4,3	4,2
<b>Moyenne</b>	<b>4,6</b>	<b>4,5</b>	<b>4,1</b>

Tableau 19: Bitumes avec ajouts - indice global GI de 0 à 10 ans

La figure 9 présente l'évolution moyenne des indices **GI** pour chaque type de liant.

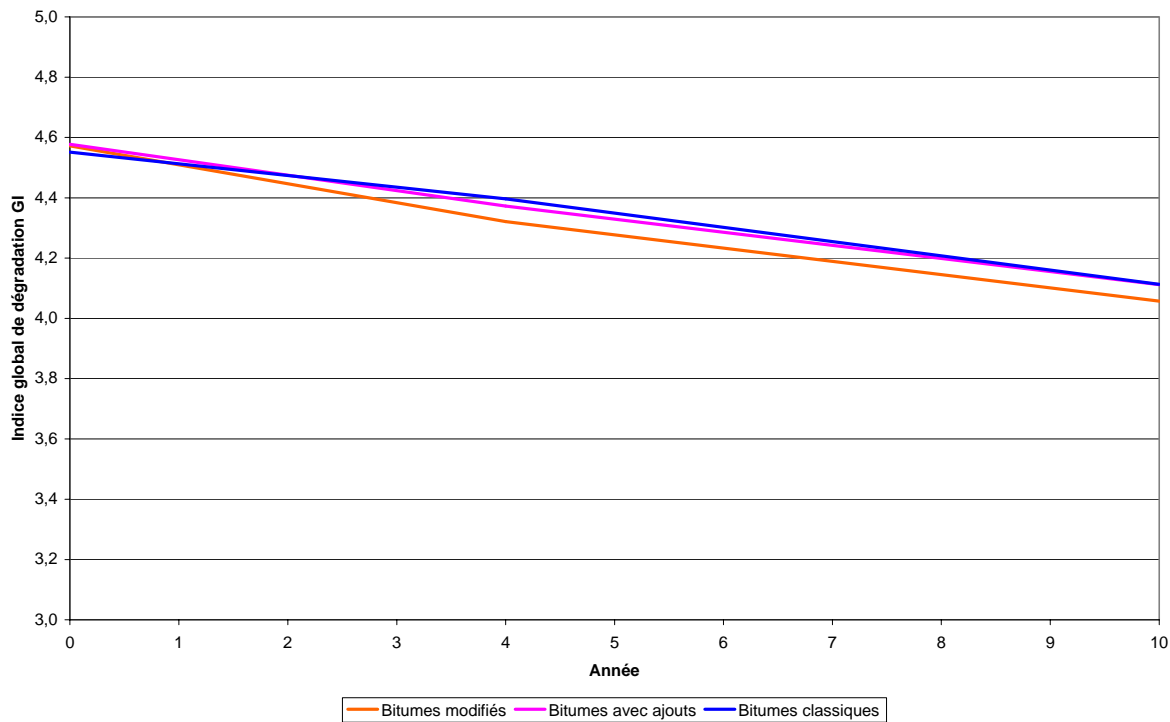


Figure 9: Evolution moyenne de l'indice GI par type de liant

L'exploitation de l'indice global de dégradation **GI** n'est pas satisfaisante dans l'optique d'une planification des mesures d'entretien des chaussées routières. Il apparaît que cet indice masque de manière significative les dégradations observées. L'évolution significative de la fissuration des planches comparatives est "noyée" dans l'indicateur **GI**. Cet indicateur ne fournit aucune sensibilité vis-à-vis des dégradations et ne permet donc pas une vision précise de l'état réel des planches comparatives.

## 7.5 ESTIMATION DE LA DUREE DE VIE DES COUCHES DE ROULEMENT

### 7.5.1 INTRODUCTION

Pour permettre de déterminer l'âge du revêtement où son renouvellement s'avérera nécessaire, il convient de pouvoir prédire l'évolution de son état à travers divers paramètres et de connaître ou fixer les seuils à partir desquelles la couche de roulement n'offrira plus les qualités minimales requises, que ce soit en matière de confort ou de sécurité pour l'utilisateur. Au niveau national, il n'existe actuellement pas de lois de comportement pouvant décrire, de manière certaine, l'évolution des dégradations des chaussées quantifiées par les indices  $I_1$  à  $I_5$ . Toutefois, des cantons préoccupés par la problématique de l'entretien, ont récolté des données relatives aux indices  $I_1$  à  $I_5$ . Sur la base de ces données, des lois d'évolution ont été élaborées qui, à défaut de mieux, sont appliquées à leur réseau cantonal; c'est notamment le cas des cantons de Neuchâtel (22) (25) et des Grisons (28) (29).

## 7.5.2 MODÈLES EXISTANTS

### 7.5.2.1 Neuchâtel

Sur la base des relevés effectués sur deux tronçons de route nationale de 2 km chacun, le SRN du canton de Neuchâtel a développé des lois d'évolution des indices  $I_1$  à  $I_3$  des chaussées routières. Dans l'état actuel et faute de mieux, ces modèles sont les seuls connus et appliqués en Suisse par un Service de Routes Nationales. Il était donc particulièrement intéressant de confronter ces modèles avec l'observation des planches comparatives du Valais.

Les modèles de comportement PARIS et Neuchâtel ont été évalués en détail dans le cadre du mandat de la recherche "Analyse des modèles de comportement des chaussées" n°11/99 (18), mené par Viagroup SA et le LAVOC.

### 7.5.2.2 PARIS

Le projet PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure) (23) financé par la Commission européenne dans le cadre du 4<sup>ème</sup> programme cadre de recherche et de développement technique de l'Union européenne, avait pour objectif de développer des modèles de comportement des chaussées routières. Ces modèles, résultent de l'observation de plus de 900 planches d'essais réparties dans 15 pays européen et permettent de prédire l'évolution de divers indicateurs d'état sur la base d'observations ponctuelles des dégradations d'une chaussée routière. Ces modèles ont été validés en utilisant des données provenant de quatre pays représentatifs des diverses conditions climatiques européennes. Une quarantaine de planches issues du réseau routier national, dont les planches du Valais, figurent au nombre des planches retenues pour l'élaboration des modèles. Ceux-ci sont donc en principe applicable au réseau routier national suisse.

## 7.6 APPLICATION DU MODÈLE PARIS AUX PLANCHES COMPARATIVES

### 7.6.1 INTRODUCTION

Le modèle de fissuration PARIS présente l'avantage de tenir compte de nombreux paramètres, ainsi le modèle intègre :

- l'étendue et la sévérité de la fissuration observée in situ,
- le type de fissuration (faièncage, fissuration transversale, fissuration longitudinale),
- l'âge du revêtement ou la charge cumulée d'essieux équivalents,
- le type de la structure (chaussée souple ou semi-rigide).

Deux modèles de fissuration PARIS ont été développés selon que l'on considère l'initiation ou la propagation du phénomène. A 7 ans, la presque totalité des planches avaient déjà initié leur fissuration, donc seule le modèle de la propagation des fissures a été retenu dans l'analyse qui suit. Ce modèle a été développé selon des techniques de régression classique. Le résultat de l'application du modèle est une pente dénommée "cracking index per year" qui, calée sur le résultat du relevé de la fissuration, donnera l'évolution attendue de celle-ci. Pour

les détails complets de la méthodologie, le lecteur est prié de se référer au rapport PARIS. Le modèle et son application aux planches comparatives sont décrits ci-dessous:

La fissuration exprimée par l'indicateur Cracking index **CI** (indice de fissuration) est fonction du type de la fissure:

$$CI = 2 * ACR + LCR + TCR$$

avec:

**CI** = Cracking index

$$ACR = ACR_{low} + 1.5 * ACR_{moderate} + 2 * ACR_{high}$$

$$LCR = LCR_{low} + 1.5 * LCR_{moderate} + 2 * LCR_{high}$$

$$TCR = TCR_{low} + 1.5 * TCR_{moderate} + 2 * TCR_{high}$$

ACR, LCR, TCR = alligator cracking (faïençage), longitudinal cracking (fissuration longitudinale), transverse cracking (fissuration transversale)

La longueur de la section de mesure est normalisée à 100 mètres. Par conséquent, la valeur maximum de l'indice **CI** est de 400, soit une section entière ayant un faïençage sévère sur toute sa longueur. Le **CI** tient compte du type de fissures rencontrées et leurs attribue un poids selon le degré de gravité de celles-ci. Il faut noter que les degrés de gravité "low, moderate, high" ne sont pas les mêmes que ceux utilisés par la norme suisse SN 640 925a. Pour pallier à cet inconvénient, des matrices de conversion ont été déterminées pour chaque pays.

## 7.6.2 CONVERSION DU I<sub>1</sub> SUISSE EN CRACKING INDEX CI

Les fissures relevées au cadre à 4, 7 et 10 ans sont classées selon les trois catégories: "alligator cracking, longitudinal cracking, transverse cracking". Les relevés au cadre ainsi que l'appréciation du type de fissures en ACR, LCR et TCR sont fournis en annexe. Il apparaît, au vu des relevés au cadre, que la fissuration des planches est répartie dans la catégorie LCR et ACR.

- Leur gravité est convertie selon le barème du tableau suivant en "low (faible), moderate (moyenne) et high (élevée)":

Note de gravité S	Gravité PARIS
0 < S < 1	L
1 ≤ S < 2	M
2 ≤ S < 3	H

- Connaissant les types de fissures et leurs gravités, nous appliquons les matrices de conversion suivantes:

Fissuration longitudinale	Matrice de conversion de la "gravité" selon la norme suisse en gravité selon PARIS						
	SUISSE	→	L	M	H	→	PARIS
	L		1	0	0		L
	M		0,5	0,3	0,2		M
	H		0,3	0,4	0,3		H

Faïençage	Matrice de conversion de la "gravité" selon la norme suisse en gravité selon PARIS						
	SUISSE	→	L	M	H	→	PARIS
	L		1	0	0		L
	M		0	1	0		M
	H		0	0	1		H

Tableau 20 : Matrices de conversion de la gravité selon la norme suisse en gravité selon PARIS

Classe	Etendue A	% du tronçon concerné	"PARIS percentage"
Norme SN 640 925			
0	Aucune dégradation	0	0
1	très localisées	< 10%	10 %
2	localisées à étendues	10..50%	25 %
3	très étendues	> 50%	75 %

Tableau 21 : Matrice de conversion de l'étendue selon la norme suisse en étendue selon PARIS

La figure ci-après montre l'évolution du CI (cracking index) pour l'ensemble des planches comparatives. On peut constater que les planches dégradées se détachent de manière significative, cela est dû au fait que PARIS donne plus de poids au faïençage de ces planches que l'indice de dégradation  $I_f$  de la norme suisse.

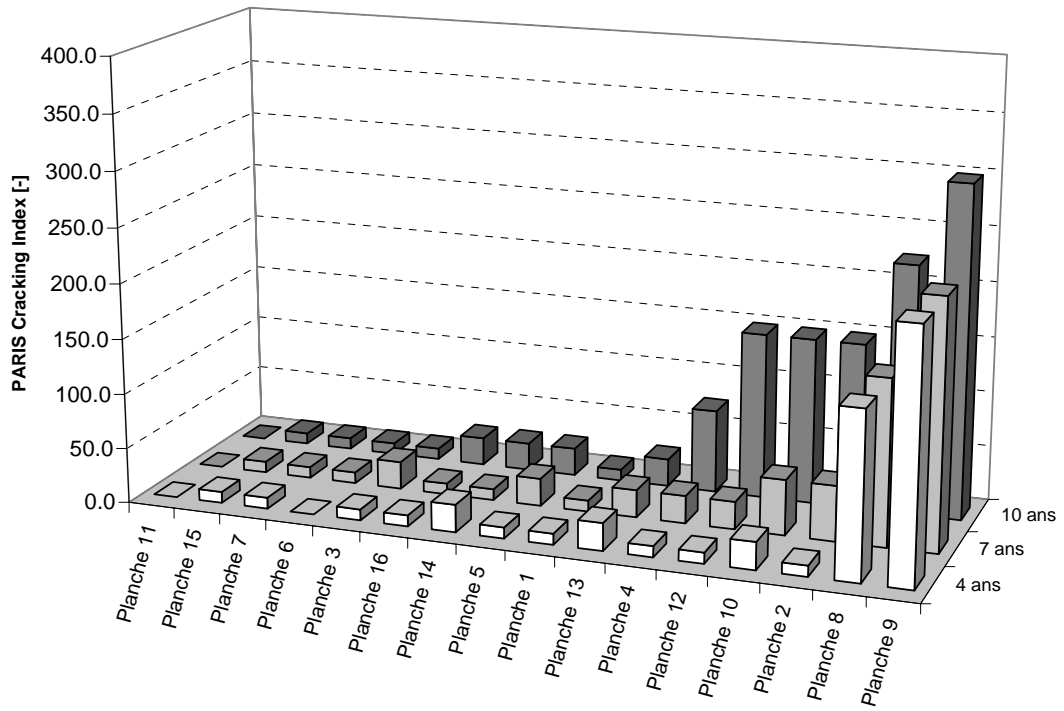


Figure 10: Représentation en "PARIS cracking index" de l'évolution de la fissuration à 4, 7 et 10 ans

- L'index CI est ensuite ramené à un coefficient qui est fonction du nombre d'années de mise en service au moment du relevé effectué:

$$CR_{age} = CI_{last} / Age_{last}$$

avec:

$CR_{age}$  = cracking relationship for age

$CI_{last}$  = cracking index at last inspection (indice de fissuration au dernier relevé d'état)

$Age_{last}$  = age of the pavement at last inspection since construction or last overlay or surface treatment (âge du revêtement ou âge de la nouvelle couche d'usure au dernier relevé d'état)

- Finalement, la pente du modèle est définie avec le coefficient  $CR_{age}$ :

$$\text{Cracking index per year} = 2,32 + (1,31 * CR_{age})$$

Les 3 tableaux ci-après présentent les conversions des relevés de la fissuration des planches comparatives en "Cracking index per year" par le modèle PARIS.

Planche n°	fissuration à 4 ans					Cracking Index per year = $2,32+(1,31*Cr_{age})$	
	Swiss severity	Type	PARIS severity	Percentage	PARIS Cracking Index	CR age	Cracking Index per year
	(-)	(-)	(-)	(%)	(-)	(-)	(-)
Planche 1	L	LCR	L	10	10,0	2,5	5,6
Planche 2	L	LCR	L	10	10,0	2,5	5,6
Planche 3	L	LCR	L	10	10,0	2,5	5,6
Planche 4	L	LCR	L	10	10,0	2,5	5,6
Planche 5	L	LCR	L	10	10,0	2,5	5,6
Planche 6	0	/	/	0	0,0	0,0	2,3
Planche 7	L	LCR	L	10	10,0	2,5	5,6
Planche 8	L	ACR	L	75	150,0	37,5	51,4
Planche 9	M	ACR	M	75	225,0	56,3	76,0
Planche 10	L	LCR	L	25	25,0	6,3	10,5
Planche 11	0	/	/	0	0,0	0,0	2,3
Planche 12	L	LCR	L	10	10,0	2,5	5,6
Planche 13	L	LCR	L	25	25,0	6,3	10,5
Planche 14	L	LCR	L	25	25,0	6,3	10,5
Planche 15	L	LCR	L	10	10,0	2,5	5,6
Planche 16	L	LCR	L	10	10,0	2,5	5,6

Tableau 22 : Conversion de la fissuration à 4 ans par le modèle PARIS

Planche n°	fissuration à 7 ans					Cracking Index per year = $2,32+(1,31*Cr_{age})$	
	Swiss severity	Type	PARIS severity	Percentage	PARIS Cracking Index	CR age	Cracking Index per year
	(-)	(-)	(-)	(%)	(-)	(-)	(-)
Planche 1	L	LCR	L	10	10,0	1,4	4,2
Planche 2	L	ACR	L	25	50,0	7,1	11,7
Planche 3	L	LCR	L	25	25,0	3,6	7,0
Planche 4	L	LCR	L	25	25,0	3,6	7,0
Planche 5	L	LCR	L	25	25,0	3,6	7,0
Planche 6	L	LCR	L	10	10,0	1,4	4,2
Planche 7	L	LCR	L	10	10,0	1,4	4,2
Planche 8	L	ACR	L	75	150,0	21,4	30,4
Planche 9	M	ACR	M	75	225,0	32,1	44,4
Planche 10	L	ACR	L	25	50,0	7,1	11,7
Planche 11	0	/	/	0	0,0	0,0	2,3
Planche 12	L	LCR	L	25	25,0	3,6	7,0
Planche 13	L	LCR	L	25	25,0	3,6	7,0
Planche 14	L	LCR	L	10	10,0	1,4	4,2
Planche 15	L	LCR	L	10	10,0	1,4	4,2
Planche 16	L	LCR	L	10	10,0	1,4	4,2

Tableau 23 : Conversion de la fissuration à 7 ans par le modèle PARIS

planche n°	fissuration à 10 ans					Cracking Index per year = $2,32+(1,31*Cr_{age})$	
	Swiss severity	Type	PARIS severity	Percentage	PARIS Cracking Index	CR age	Cracking Index per year
	(-)	(-)	(-)	(%)	(-)	(-)	(-)
Planche 1	L	LCR	L	10	10,0	1,0	3,6
Planche 2	L	ACR	L	75	150,0	15,0	22,0
Planche 3	L	LCR	L	10	10,0	1,0	3,6
Planche 4	L	LCR	L	75	75,0	7,5	12,1
Planche 5	L	LCR	L	25	25,0	2,5	5,6
Planche 6	L	LCR	L	10	10,0	1,0	3,6
Planche 7	L	LCR	L	10	10,0	1,0	3,6
Planche 8	M	ACR	M	75	225,0	22,5	31,8
Planche 9	H	ACR	H	75	300,0	30,0	41,6
Planche 10	L	ACR	L	75	150,0	15,0	22,0
Planche 11	0	/	/	0	0	0	2,3
Planche 12	L	ACR	L	75	150,0	15,0	22,0
Planche 13	L	LCR	L	25	25,0	2,5	5,6
Planche 14	L	LCR	L	25	25,0	2,5	5,6
Planche 15	L	LCR	L	10	10,0	1,0	3,6
Planche 16	L	LCR	L	25	25,0	2,5	5,6

Tableau 24 : Conversion de la fissuration à 10 ans par le modèle PARIS

A titre d'exemple, la figure ci-dessous représente les évolutions prévues de la fissuration de la planche 4 basée sur les relevés à 4, 7 et 10 ans :

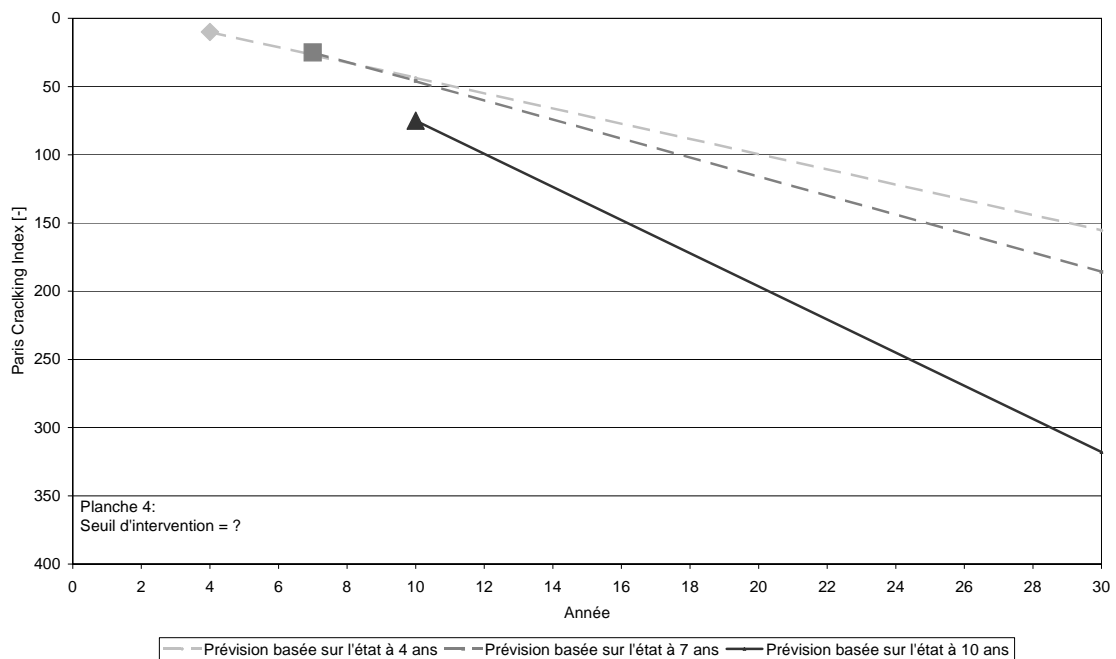


Figure 11: Prévision PARIS de l'évolution de la fissuration – Exemple de la planche 4

### 7.6.3 DÉTERMINATION D'UN SEUIL D'INTERVENTION

La norme suisse SN 640 730b "Entretien des chaussées" (9) donne les types de mesures d'entretien à appliquer pour les chaussées en fonction des niveaux de dégradation observés. Dans l'état actuel, la norme propose des appréciations qui ne sont que qualitatives et ne donnent aucune indication sur des valeurs critiques des indicateurs d'état pris en considération. De ce fait, nous avons calculé la valeur critique de fissuration nécessitant le renouvel-

lement de la couche d'usure en prenant en compte les critères qualitatifs de la norme pour une telle intervention, soit:

- (1) fissures moyennes très étendues
- (2) fissures graves localisées à étendues
- (3) fissures graves très étendues

La matrice des produits M prenant en compte la gravité (S) et l'étendue (A) de la fissuration est la suivante:

$M_i=S_i, A_i$	$A_i=0$	$A_i=1$	$A_i=2$	$A_i=3$
$S_i=1$	0	1	2	3
$S_i=2$	0	2	4	<b>6*</b>
$S_i=3$	0	3	<b>6*</b>	<b>9*</b>

\* Valeurs critiques

Tableau 25: Matrice d'évaluation M - Détermination du seuil critique

En considérant le faïençage comme étant le cas critique de la fissuration, on peut déterminer les valeurs critiques du Cracking Index PARIS correspondant:

**Cas 1:**

faïençage,  $S=2$  et  $A=3 \Rightarrow CI = 2 (1,5 \cdot 75) = 225$

**Cas 2:**

faïençage,  $S=3$  et  $A=2 \Rightarrow CI = 2 (2 \cdot 25) = \underline{100} \Rightarrow \text{cas déterminant}$

**Cas 3:**

faïençage,  $S=3$  et  $A=3 \Rightarrow CI = 2 (2 \cdot 75) = 300$

Le **CI critique** pris en compte est donc égal à 100. A titre d'exemple, la Figure 12 illustre, à nouveau, le cas de la planche 4:

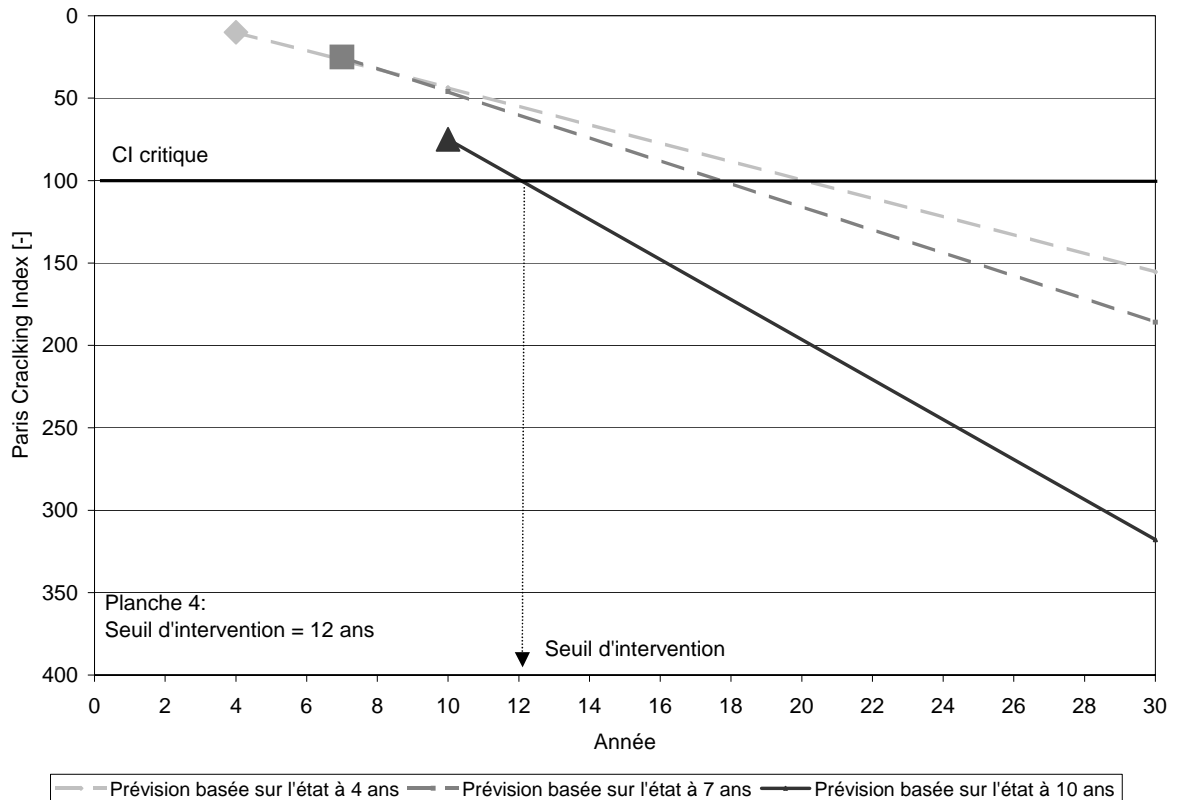


Figure 12: Détermination du seuil d'intervention théorique, planche 4

Ainsi, pour toutes les planches comparatives, les seuils d'intervention théoriques qui nécessiteront un renouvellement de la couche de roulement ont été déterminés.

## 7.7 BILAN DU COMPORTEMENT

Sur la base des conditions structurelles et des sollicitations permanentes de trafic et climatiques propres aux planches comparatives du Valais, à savoir :

- l'homogénéité structurelle des couches de fondation et des couches de support (qualité des matériaux, épaisseur des couches, teneur en vides),
- les conditions climatiques identiques,
- les charges de trafic identiques et en deçà des valeurs retenues pour le dimensionnement,

et, sur la base des relevés visuels effectués in situ quantifiés par les indices de dégradations, il apparaît que la **fissuration des couches de roulement** a évolué de façon significative durant les 10 premières années de vie de la chaussée. Ainsi après 10 ans de mise en service, on constate que certaines planches présentent une fissuration de surface plus ou moins avancée. Le type de la superstructure, la conformité des matériaux aux exigences fixées dans les normes y relatives et l'exécution de la chaussée dans les exigences requises, ne permettent pas d'introduire un doute sur une fatigue mécanique prématurée de la couche de roulement. Le suivi des planches comparatives pose de nombreuses questions sur la durée de vie des chaussées routières soumises aux sollicitations thermiques contrastées ; en effet, le Valais possède un climat subissant des variations journalières et saisonnières importantes de température.

## 7.8 CONSIDÉRATIONS SUR LE COMPORTEMENT

L'analyse selon le type des liants retenus en 1988 (c.f. tableau 3) et selon le bilan de l'état de la fissuration des planches comparatives après 10 ans de mise en service (c.f. Figure 5) permet d'émettre les conclusions suivantes :

- parmi les planches au bitume classique (planches 1,2,15,16), il convient de relever un comportement significativement meilleur des revêtements contenant un bitume de distillation directe (15 et 16) . Ce mode d'élaboration des bitumes, qui a supplanté dans beaucoup de raffineries l'ancienne méthode de soufflage, améliore les propriétés du liant et par conséquent le comportement des enrobés,
- les planches constituées de bitumes avec ajouts de polymères (planches 10 et 12) ont un comportement inférieur aux planches constituées de bitumes polymères prêts à l'emploi. Ce mauvais comportement relatif peut s'expliquer par le mode d'élaboration des bitumes avec ajouts qui diffèrent du mode de fabrication des bitumes modifiés. En effet, les bitumes modifiés aux polymères sont élaborés, par les compagnies pétrolières, avant la phase d'enrobage de l'enrobé. Leur fabrication est optimisée afin de permettre aux phases bitumes-polymère d'atteindre leur maturation ; le bitume modifié est maintenu suffisamment longtemps à une température élevée permettant une homogénéisation optimale du bitume avec le polymère, notamment l'absorption des huiles aromatiques par celui-ci. Les enrobés constitués de bitumes avec ajouts diffèrent par leur mode de fabrication. L'ajout de poudre de polymère ou de Trinidad s'effectue lors de l'enrobage du granulat avec le liant, il n'y a donc pas de phase de maturation,
- la planche n° 13 constituée d'ajouts d'asphalte naturel présente un comportement dans l'ensemble moyen par rapport à l'ensemble des planches comparatives,
- le meilleur comportement est observé sur une planche au bitume polymère (planche 11). Cela tend à démontrer que l'emploi de ce type de bitume se justifie pour des enrobés soumis à un très fort trafic, des enrobés à revêtement mince (Macro, SMA), de même que pour des enrobés drainants, lorsqu'il présente de bonnes caractéristiques et qu'il entraîne un meilleur comportement de l'enrobé.

## CHAPITRE 8 ASPECTS PRÉDICTIFS DES ESSAIS DE LABORATOIRE

### 8.1 DÉMARCHE DE L'ANALYSE

La démarche qui a été réalisée propose l'analyse de plusieurs cas, ce sont :

L'analyse des caractéristiques sur les liants et enrobés à la livraison, d'une part, et d'autre part, sur les liants et enrobés récupérés après la mise en œuvre et 8 ans de mise en service.

L'analyse des évolutions des caractéristiques mesurées à la livraison, après la mise en œuvre, et à 8 ans.

L'analyse des caractéristiques mesurées après les essais de vieillissement accéléré DIN (ou RTFOT selon les cas) et PAV

L'analyse des évolutions des caractéristiques mesurées à la livraison, après les essais de vieillissement accéléré DIN (ou RTFOT selon les cas) et PAV

L'analyse des corrélations, entre les résultats d'essais et l'ampleur de la fissuration mesurée in situ, permettra de mettre en évidence les essais qui présentent un caractère prédictif de l'état de surface des planches comparatives à 10 ans.

Une première analyse a été menée sur l'ensemble des 16 liants selon des modèles de corrélation linéaires et exponentielles (c.f. annexe 5). L'analyse des tableaux présentés en annexe montre que l'application de régressions linéaires est préférable à celles obtenues par le biais de régressions exponentielles, ces corrélations étant dans l'ensemble supérieures. La suite du rapport propose l'analyse des essais basée uniquement sur les régressions linéaires.

Une deuxième analyse a été menée sur des familles de produit (c.f. annexe 6 et 7). Au risque de perdre en terme de validité statistique, il apparaît cependant nécessaire d'écartier tout d'abord les deux bitumes polymères ayant été complétés par un ajout. Ces planches n° 8 et 9 n'ont en fait pas résisté plus de quelques mois et semblent indiquer un effet chimique d'oxydation rapide plutôt qu'une dégradation progressive causée par les effets du trafic ou du climat.

4 cas ont été considérés dans cette analyse, ce sont les cas:

1. Tous les liants
2. Tous les liants sauf les n°8 et 9
3. Les liants purs, soit les n° 1, 2, 15 et 16
4. Les liants modifiés n° 3 à 7, 11 et 14 (les liants 8 et 9 sont écartés)

Les liants avec ajouts ne représentent pas un échantillon suffisamment grand pour une analyse des corrélations. De plus, il faut noter que les liants 10 et 12 ont la même ampleur de fissuration à 10 ans, soit 25% chacun (c.f. Tableau 11 du rapport).

Les données à disposition étant parfois insuffisantes quantitativement pour permettre de conclure à des corrélations significatives, la démarche de l'analyse propose de différencier 3 catégories de résultats, ce sont:

1. **Les indices de corrélation  $R^2$  supérieurs ou égaux à 0.80** dont la régression est composée d'un nombre de résultats d'essai supérieur ou égal à 10. Dans ce cas, on admet que la **corrélacion est significative**.
2. **Les indices de corrélation  $R^2$  supérieurs ou égaux à 0.80** dont la régression est composée de 4 à 10 résultats d'essai. Dans ce cas, on parle de tendance.
3. **Les indices de corrélation  $R^2$  supérieurs ou égaux à 0.80** dont la régression est composée de 3 résultats d'essai, ce cas ne peut être considéré d'un point de vue statistique.

Les tableaux présentés en annexe 6 et 7 tiennent compte de cette répartition.

## 8.2 ESSAIS SUR LES LIANTS

Le Tableau 26 contient la liste des essais qui ont été réalisés sur les liants à la livraison avant leur passage à la centrale d'enrobage ainsi que sur les liants récupérés sur les enrobés prélevés à 0, 4, 8 ans. Ces essais ont été répétés sur les liants à la livraison après un traitement thermique simulant le vieillissement correspondant au passage à la centrale d'enrobage, ce sont les procédures DIN (ou RTFOT) . De même, des essais PAV de vieillissement simulant le vieillissement in situ du liant ont été entrepris.

Essai sur les liants	Livraison	Vieillessement accéléré			Liants récupérés sur carottes prélevées in situ		
		RTFOT	DIN	PAV	0 an	4 ans	8 ans
Pénétration à 25°C	X	X	X	X	X	X	X
Anneau et Bille	X	X	X	X	X	X	X
Viscosité dynamique sur rhéomètre à 130°C	X	X	X	X	X	X	X
Point de rupture selon Fraass	X	X	X	X	X	X	X
Essai de traction directe à +20°C	X	X	X	X	X	X	X
Essai de traction directe à -10°C	X	X	X	X	X	X	X
Teneur en asphalte	X	X	X		X	X	
Essai de ductilité-force à 5°C	X			X		X	X
Bending Beam Rheometer	X		X	X	X	X	X
Détermination des caractéristiques rhéologiques au Rhéomètre Dynamique	X			X		X	X
Essai de spectrographie FTIR	X			X		X	X

X : réalisé

Tableau 26: Programme d'essais sur les liants

## 8.2.1 RÉSULTATS

La quantité des données des résultats d'essai sont considérables et ne font pas partie du présent rapport. Ces données font l'objet de rapports d'essais non publiés.

Les tableaux regroupant les indices de corrélation entre les essais réalisés sur les liants et l'ampleur de la fissuration à 10 ans sont en annexe 6.

## 8.2.2 SYNTHÈSE DES CORRÉLATIONS SIGNIFICATIVES SUR LES LIANTS

### *Essais standards sur liants*

L'évolution de la viscosité à 150°C mesurée à la livraison et sur des échantillons prélevés après la mise en œuvre, montre un  $R^2$  de 0.84 sur tous les liants (y compris 8 et 9) exceptés les liants avec ajouts sur lesquels aucune mesure à la livraison n'a été possible de part leur mode de fabrication en centrale (Figure 13).

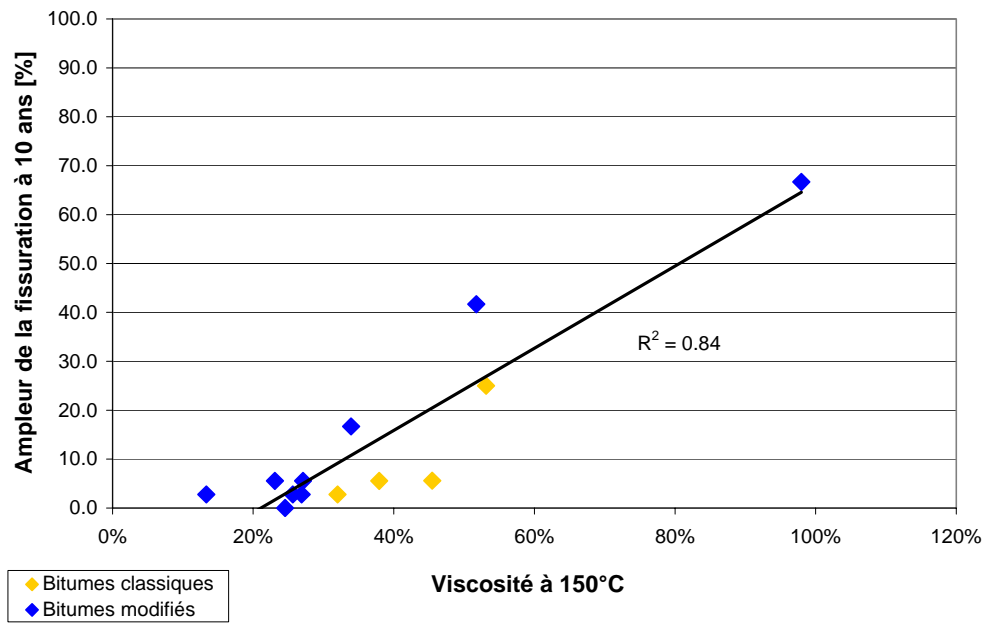


Figure 13: Viscosité à 150°C - Effet du vieillissement en centrale et mise en oeuvre vis-à-vis de l'ampleur de la fissuration à 10 ans – Tous les liants (sauf 10,12 et 13)

Cette corrélation significative se retrouve sur les mesures de la viscosité à 130°C avec un  $R^2$  de 0.81 (c.f. Figure 14).

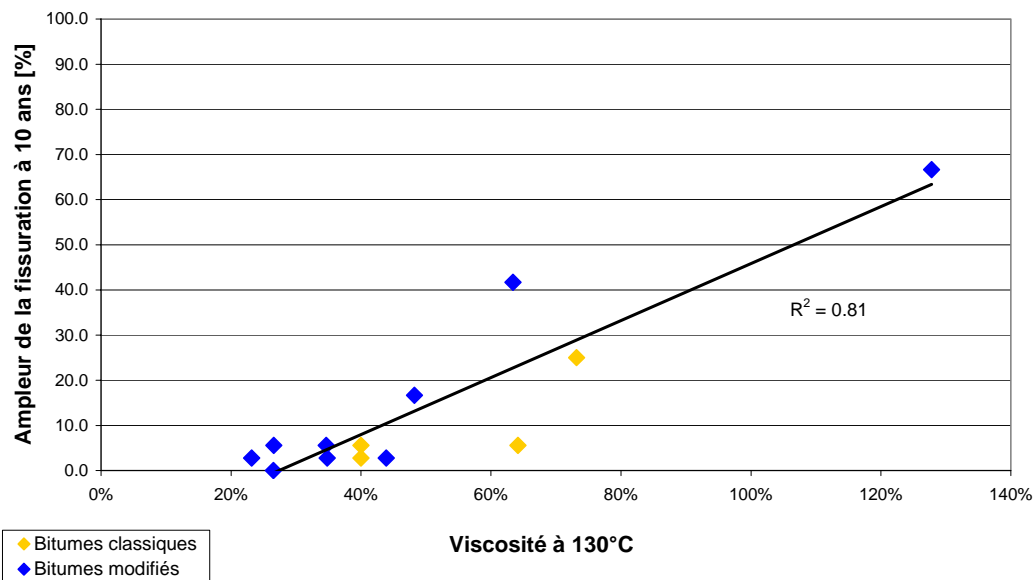


Figure 14: Viscosité à 130°C - Effet du vieillissement en centrale et mise en oeuvre vis-à-vis de l'ampleur de la fissuration à 10 ans – Tous les liants (sauf 10,12 et 13)

Ainsi, on constate une capacité prédictive des essais de mesure de la viscosité à 150°C et 130°C (température normalisée SN). Cette tendance mentionnée par l'étude entreprise après 4 ans de mise en service (13) est ainsi confirmée. L'évolution du vieillissement du liant après son passage en centrale et sa mise en œuvre, mesurée par l'évolution de la viscosité

entre la livraison et la récupération après la mise en œuvre, apparaît comme un indicateur pertinent par rapport à l'état de la fissuration à 10 ans.

### *Nouveaux essais sur liants*

On constate une corrélation significative de l'essai Bending Beam Rheometer, notamment par la caractéristique du liant donnée par la pente  $m$  de la courbe de charge mesurée à  $-15^{\circ}\text{C}$  et 60 secondes avec un indice de  $R^2 = 0.86$ , cela sur tous les liants (y compris 8 et 9) exceptés les liants avec ajouts (c.f. Figure 15).

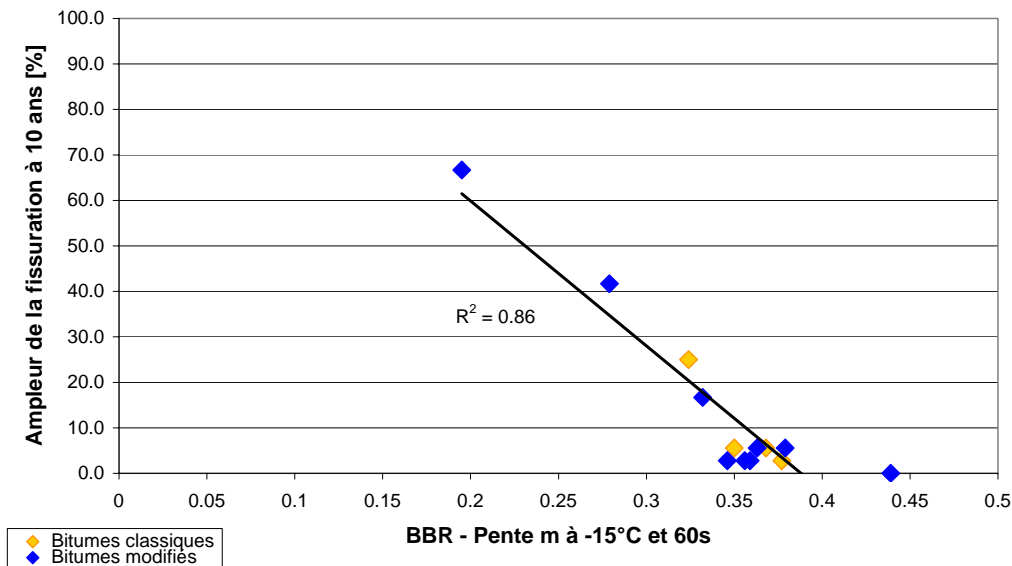


Figure 15: BBR pente  $m$  à  $-15^{\circ}\text{C}$  et 60 s - Caractéristique mesurée après la mise en œuvre – Tous les liants (sauf 10,12 et 13)

Le bon résultat obtenu par le BBR sur le liant récupéré après la mise en œuvre ne peut malheureusement pas être vérifié par les mesures effectuées sur le liant d'origine vieilli par l'essai DIN faute du peu de résultats à disposition.

## 8.3 ESSAIS SUR LES ENROBÉS

Le ci-après contient la liste des essais réalisés sur les enrobés prélevés avant la mise en œuvre et les essais réalisés sur les carottes d'enrobé prélevées in situ à 0, 4 et 8 ans.

Essai sur les enrobés	Enrobés prélevés à la livraison*	Enrobés prélevés in situ (sondage carotté)		
		0 an	4 ans	8 ans
Module complexe 15°C; 10Hz	X		X	X
Essai de Fatigue, déformation à 1 E6 cycles	X		X	X
Compression diamétrale à -10°C, +45°C	X	X	X	X
Essai de flexion dynamique -10°C		X	X	X
Essai de fluage dynamique à 50°C		X		X
Essai de retrait thermique empêché		X		X
Essai de traction directe				X

X : réalisé

Tableau 27: Programme d'essais sur les enrobés

Notons que les enrobés prélevés à la livraison ont été, par la suite, réchauffés en laboratoire pour la réalisation des éprouvettes d'essai.

### 8.3.1 RÉSULTATS DES ESSAIS

Les résultats des essais ne font pas parties du présent rapport.

Les tableaux regroupant les indices de corrélation entre les essais réalisés sur les enrobés et l'ampleur de la fissuration à 10 ans sont en annexe 7.

### 8.3.2 SYNTHÈSE DES CORRÉLATIONS SIGNIFICATIVES SUR LES ENROBÉS

L'analyse des indices de corrélation obtenus par les régressions linéaires issues des caractéristiques mesurées sur les enrobés et par famille de produit vis-à-vis de l'ampleur de la fissuration à 10 ans, met en évidence une seule caractéristique prédictive. En effet, l'essai de retrait thermique empêché, réalisé sur les enrobés prélevés après la mise en œuvre, montre une corrélation significative satisfaisante proche de 0.80 donnée par la température de transition de l'essai ( $R^2=0.79$ ).

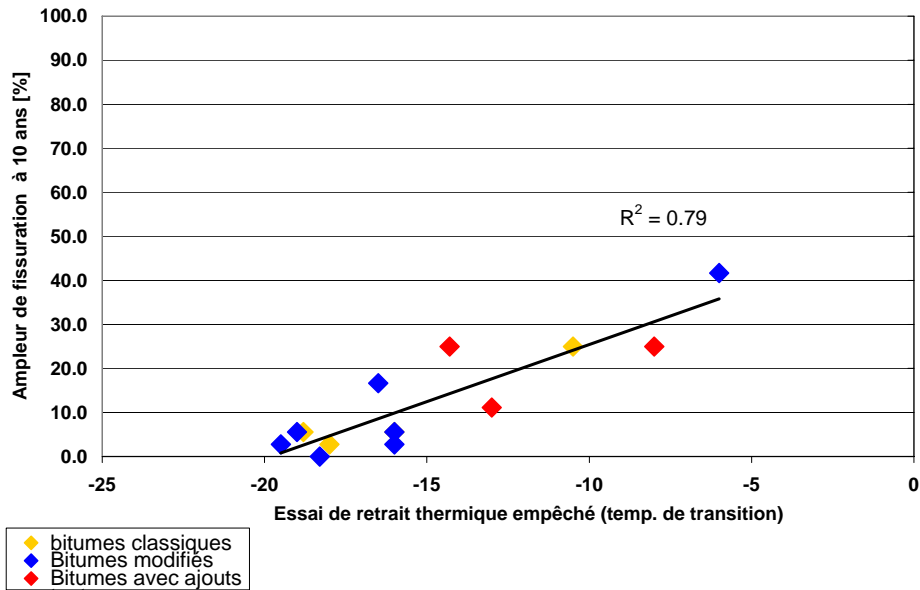


Figure 16: Essai de retrait thermique empêché – température de transition mesurée après la mise en œuvre – Tous les liants (sauf 7 et 9\*)

\* pas de résultats à disposition sur ces planches après la mise en oeuvre

Le chapitre 11 propose une présentation de l'essai de retrait thermique empêché ainsi qu'une présentation détaillée de ses résultats.

## CHAPITRE 9 BILAN ECONOMIQUE

### 9.1 INTRODUCTION ET LIMITES DE L'ÉTUDE

Face aux dégradations des chaussées routières, notamment, comme dans le cas des planches comparatives du Valais, face à la fissuration de surface de la couche de roulement, le gestionnaire du réseau routier doit avoir la possibilité d'effectuer un calcul économique prévisionnel qui sera fonction de l'âge du revêtement à partir duquel le renouvellement de la couche d'usure s'avérera nécessaire. Ainsi, il convient de pouvoir prédire l'évolution de l'état de la chaussée par le biais de modèles de comportement des dégradations et de déterminer les seuils à partir desquelles la couche de roulement n'offrira plus les exigences minimales requises en terme d'exploitation du réseau routier.

Sur la base de la durée de vie des planches d'essais déterminée selon la méthode décrite au chapitre 7.6.3 et des coûts moyens des bitumes à l'achat, l'analyse économique basée sur un amortissement annuel permet d'effectuer un comparatif économique. Notons que les coûts globaux dus aux travaux d'entretien, à la gêne de l'utilisateur, à l'environnement (recyclage, bruit, pollution) et à la sécurité ne sont pas pris en compte dans cette étude. La prise en compte de ces coûts plaiderait en faveur d'une longue durée de vie des chaussées et sanctionnerait, de ce fait, les mauvais matériaux.

Certains bitumes modifiés ont évolué ou ont été remplacés par d'autres produits depuis 1988; de même, les prix des bitumes ont évolué de manière significative depuis la réalisation des planches d'essais. De ce fait, l'analyse économique a été réalisée sur la base des prix moyens des divers types de liants. Notons que le ratio initial des prix en 1988 de l'ordre de 2 à 2.5 entre le prix d'un bitume classique et le prix d'un bitume modifié est aujourd'hui encore d'actualité. Le prix de l'enrobé dépend principalement du prix du liant de base qui peut varier entre 200.- CHF à 300.- CHF la tonne selon les conditions du marché pétrolier.

### 9.2 BILAN ÉCONOMIQUE

Les éléments du calcul pris en compte sont les suivants (prix indicatif au début 2000):

- Prix du liant de base = 300.-/tonne
- Prix du liant modifié = 700.-/tonne
- tronçon autoroutier de référence de 1 kilomètre
- épaisseur de la couche d'usure de 4 cm
- masse de l'enrobé de 2,4 t/m<sup>3</sup>

Pour 1 kilomètre autoroutier, la quantité théorique de liant, pour un dosage de 6% sur enrobé, est de 57'600 kg.

Le donne le calcul des amortissements annuels des coûts des bitumes basé sur la période de durée de vie estimée selon les prévisions du modèle PARIS. Le taux d'intérêt fixe de l'emprunt

est choisi à 3,5% ce qui correspond au taux moyen des emprunts de la confédération en 1999.

Planche n°	Prix liant/tonne	Prix du liant au kilomètre auto-routier	Durée de vie estimée	Amortissement annuel du coût du liant
1	SFr. 300,00	SFr. 17 280,00	30	SFr. 908
15	SFr. 300,00	SFr. 17 280,00	30	SFr. 908
16	SFr. 300,00	SFr. 17 280,00	24	SFr. 1'040
13	SFr. 700,00	SFr. 40 320,00	24	SFr. 2'426
2	SFr. 300,00	SFr. 17 280,00	8	SFr. 2'429
7	SFr. 700,00	SFr. 40 320,00	30	SFr. 2'118
3	SFr. 700,00	SFr. 40 320,00	30	SFr. 2'118
14	SFr. 700,00	SFr. 40 320,00	24	SFr. 2'426
6	SFr. 700,00	SFr. 40 320,00	30	SFr. 2'118
11	SFr. 700,00	SFr. 40 320,00	30	SFr. 2'118
5	SFr. 700,00	SFr. 40 320,00	24	SFr. 2'426
4	SFr. 700,00	SFr. 40 320,00	12	SFr. 4'031
10	SFr. 700,00	SFr. 40 320,00	8	SFr. 5'667
12	SFr. 700,00	SFr. 40 320,00	8	SFr. 5'667
9	SFr. 700,00	SFr. 40 320,00	2	SFr. 20'507
8	SFr. 700,00	SFr. 40 320,00	3	SFr. 13'905

Tableau 28: Amortissement annuel du coût du liant calculé sur la durée de vie des couches de roulement

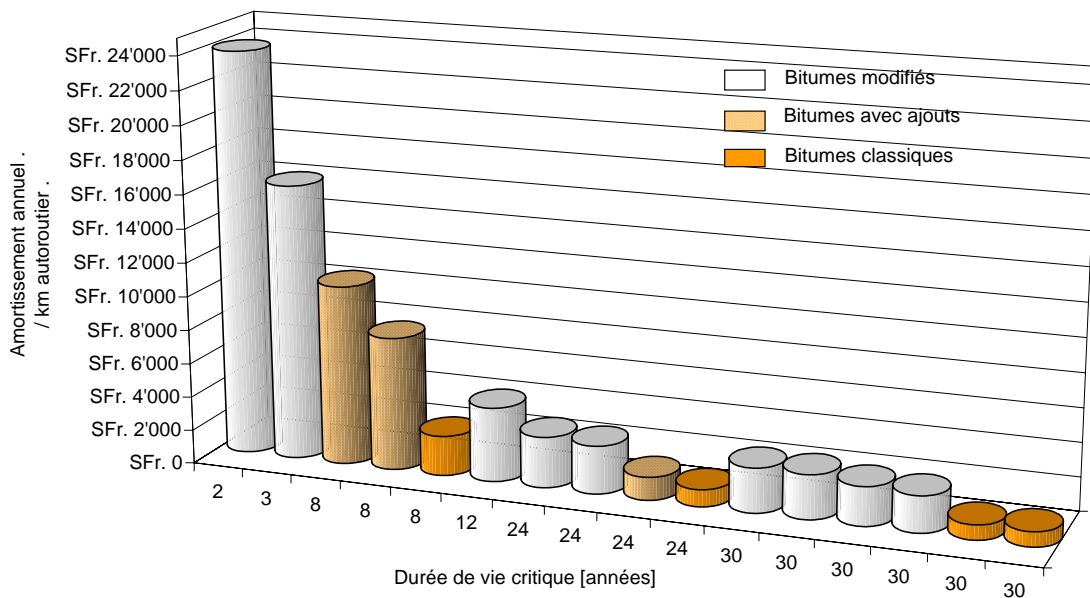


Figure 17: Amortissement annuel du coût induit par le choix du type de liant

## 9.3 CONSIDÉRATIONS SUR L'ASPECT ÉCONOMIQUE

Dans le cas des planches comparatives, constituées d'un enrobé dense, à granulométrie continue de type AB avec de surcroît une faible susceptibilité à l'orniérage, qui est soumis à un "faible" trafic, et dont les seules dégradations sont la fissuration de surface, les conclusions suivantes sont avancées :

L'analyse économique basée sur la durée de vie de la couche de roulement montre que le surcoût d'un bitume modifié n'est pas amorti par un meilleur comportement.

Les planches dont la durée de vie est inférieure à 12 ans (2,4,8,9,10,12) apporte un surcoût qui ne se justifie pas.

Un liant classique (n°2) est financièrement intéressant mais sur un intervalle de remplacement de 8 ans. Il manque donc ici la prise en compte du coût de l'utilisateur lié au chantier d'entretien.

## CHAPITRE 10 ETUDE SUR LE VIEILLISSEMENT ACCELERÉ EN LABORATOIRE

Dans le cadre du programme d'essai sur plusieurs années, des carottes ont été prélevées après 0, 4 et 8 années. Le comportement au vieillissement du revêtement mis en place peut être suivi grâce au liant récupéré de ces carottes. De plus le liant à son état de livraison a été analysé et vieilli artificiellement en laboratoire:

- récupéré après 0 année; liant récupéré des carottes prélevées in situ directement après la pose des enrobés
- récupéré après 4 années; liant récupéré des carottes prélevées in situ 4 ans après la pose
- récupéré après 8 années; liant récupéré des carottes prélevées in situ 8 ans après la pose
- liant à son état de livraison
- vieillissement en laboratoire selon la méthode DIN
- vieillissement en laboratoire selon la méthode PAV (Pressure Aging Vessel)

Le liant a été récupéré de l'enrobé des carottes par le LAVOC à Lausanne et mis à disposition d'IMP.

Le vieillissement du liant (vieillissement DIN et PAV) ont eut lieu chez IMP.

Les essais suivants ont été effectués sur les liants :

- Pénétration à 25°C
- Point de ramollissement Anneau et Bille
- Point de rupture selon Fraass
- Recouvrance élastique
- Bending Beam Rheometer
- Force - ductilité

### Vue d'ensemble des essais effectués

Essai	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Pénétration	✓	X	✓	X	✓	✓
Anneau et Bille	✓	X	✓	X	✓	✓
Point de rupture Fraass	✓	X	✓	X	✓	✓
Recouvrance élastique	✓	X	✓	X	✓	✓
Force - ductilité	✓	X	✓	X	✓	✓
Bending Beam Rheometer	✓	X	✓	X	✓	✓

✓ = Essais effectués sur tous les liants

X = Essais effectués pour autant que suffisamment de matériel fut à disposition

Tableau 29: Vue d'ensemble des essais effectués

Livraison : liants à la livraison

DIN : liants à la livraison après vieillissement selon méthode DIN

PAV : liants à la livraison après vieillissement selon méthode PAV

0 ans : liants récupérés sur carottes prélevées in situ directement après la pose

4 ans : liants récupérés sur carottes prélevées in situ 4 ans après la pose

8 ans : liants récupérés sur carottes prélevées in situ 8 ans après la pose

## 10.1 RÉSULTATS DES ESSAIS PHYSIQUES

### 10.1.1 PÉNÉTRATION

Pénétration à 25°C [ <sup>1</sup> / <sub>10</sub> mm]							
Planches d'essai	N° IMP	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	A96-0113	80	47	26.3	43	34	16
Nr. 2	A96-0114	52	33	19.4	30	23	13
Nr. 3	A96-0115	77	51	26.0	50	39	22
Nr. 4	A96-0116	56	39	17.0	35	24	16
Nr. 5	A96-0117	71	50	28.0	45	33	20
Nr. 6	A96-0118	62	48	26.0	45	28	19
Nr. 7	A96-0119	51	37	18.2	36	24	15
Nr. 8	A96-0120	61	38	25.7	37	26	22
Nr. 9	A96-0121	62	41	18.0	31	24	20
Nr. 11	A96-0124	75	52	29.0	56	40	26
Nr. 14	A96-0127	61	42	21.0	43	33	18
Nr. 15	A96-0128	77	46	22.0	48	38	23
Nr. 16	A96-0129	58	37	18.5	39	28	16

Tableau 30: Vue d'ensemble des résultats de l'essai de pénétration

La détermination de la pénétration à 25°C a été effectuée selon la norme suisse en vigueur lors du projet SN 671 740a.

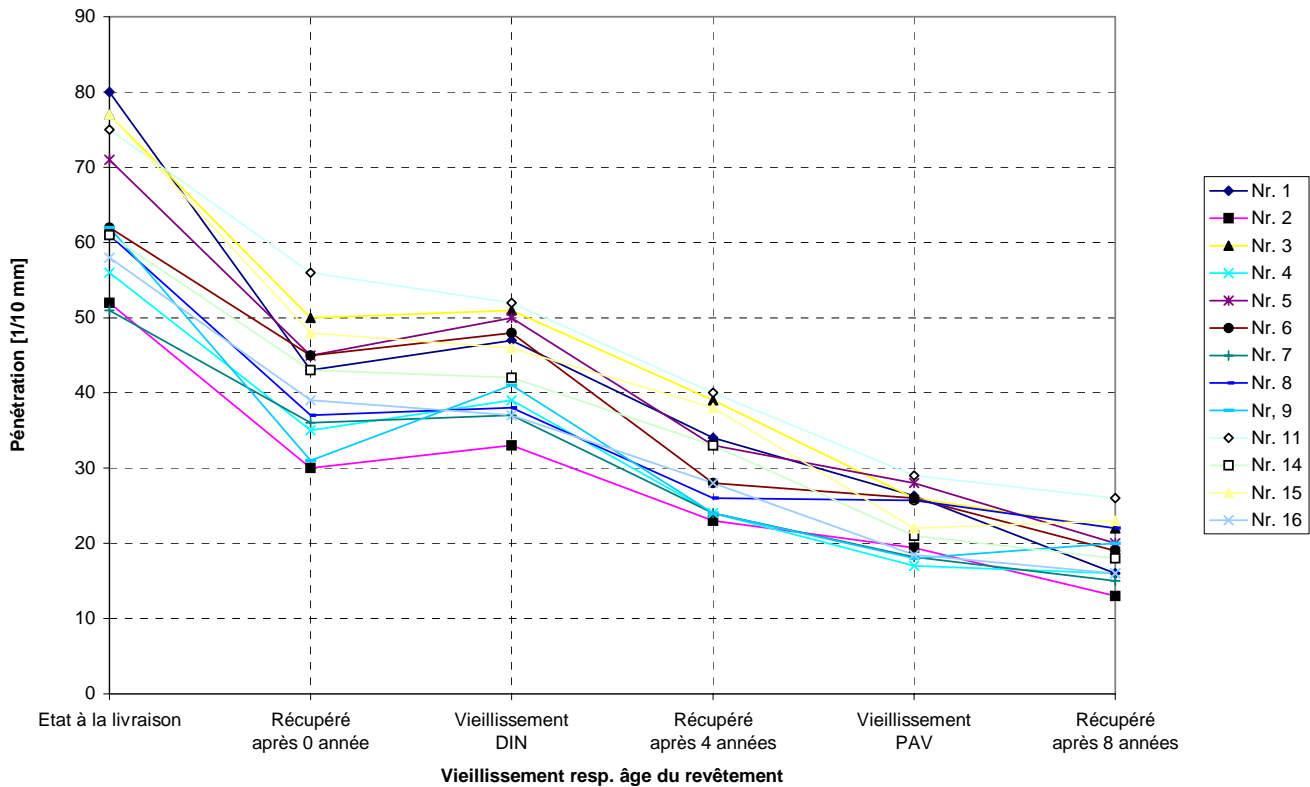


Figure 18: Evolution de la pénétration en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

La Figure 18 montre l'évolution de la pénétration en fonction du temps. Le vieillissement en laboratoire DIN et PAV sont insérés dans l'axe du temps à côté des valeurs y correspondantes. Le vieillissement selon la méthode DIN correspond à un vieillissement à court terme et a été ainsi inséré près des valeurs "récupéré après 0 année" ; le vieillissement selon la méthode PAV correspond selon les données du programme SHRP à un vieillissement à long terme compris entre 4 et 8 années.

L'évolution de la pénétration pour l'ensemble des liants analysés se trouve dans une bande relativement étroite. Malgré d'importantes dispersions pour quelques résultats isolés, une tendance peut être mise en évidence.

De plus, il est à remarquer, que le vieillissement selon la méthode DIN corrèle très bien avec les valeurs obtenues directement après la pose. Le vieillissement à long terme simulé en laboratoire (PAV) se trouve entre les valeurs obtenues après 4 et 8 ans, mais avec une tendance plus proche des valeurs après 8 ans.

## 10.1.2 ANNEAU ET BILLE

<b>Anneau et Bille</b> [°C]							
Planches d'essai	N° IMP	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	A96-0113	47.1	54.6	63.0	54.0	58.5	68.9
Nr. 2	A96-0114	52.2	59.5	71.4	59.7	67.8	77.2
Nr. 3	A96-0115	53.1	60.1	68.8	58.6	63.9	68.1
Nr. 4	A96-0116	55.1	62.1	77.4	60.7	68.0	77.5
Nr. 5	A96-0117	80.6	76.0	70.3	77.6	71.8	74.3
Nr. 6	A96-0118	81.0	74.4	73.5	77.6	74.7	77.6
Nr. 7	A96-0119	59.3	64.1	76.4	63.4	69.9	78.2
Nr. 8	A96-0120	59.5	72.1	88.5	68.7	78.4	81.6
Nr. 9	A96-0121	54.8	63.7	78.5	67.9	76.9	80.9
Nr. 11	A96-0124	53.0	57.9	68.2	56.9	62.5	64.8
Nr. 14	A96-0127	55.1	61.5	74.4	60.1	66.7	75.1
Nr. 15	A96-0128	47.4	54.6	65.3	53.0	57.9	63.2
Nr. 16	A96-0129	49.4	55.9	67.4	55.4	62.3	67.4

Tableau 31: Vue d'ensemble des résultats de l'essai du point de ramollissement Anneau et Bille

La détermination du point de ramollissement Anneau et Bille a été effectuée selon la norme suisse en vigueur lors du projet SN 671 743a.

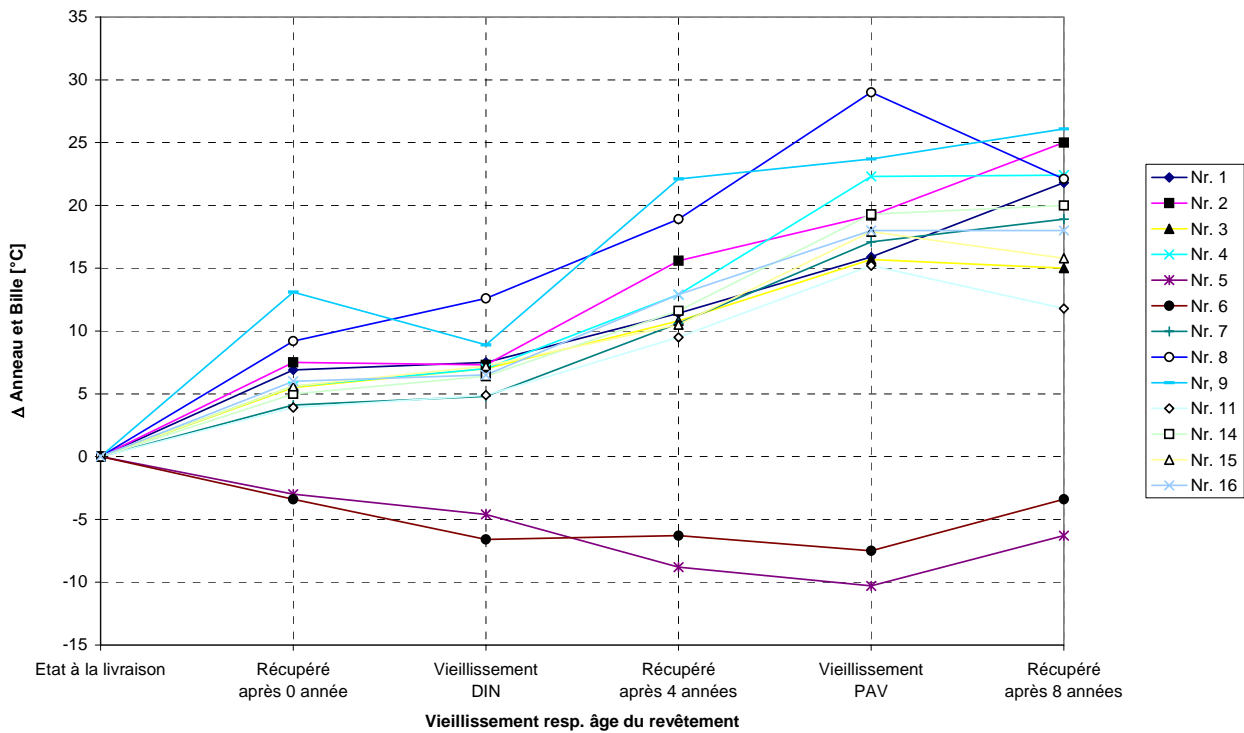


Figure 19: Evolution du point de ramollissement Anneau et Bille en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

La figure 19 montre l'évolution du point de ramollissement Anneau et Bille en fonction du temps. En ce qui concerne l'emplacement des vieillissements en laboratoire, les remarques pour la Figure 18 sont ici aussi valables.

Dans ce graphique, ce ne sont pas les valeurs propres pour le point de ramollissement Anneau et Bille qui sont montrées, mais leur variation par rapport aux valeurs obtenues à l'état de livraison.

Les liants des planches N° 5 et 6 se comportent complètement différemment de l'ensemble des autres liants. Le processus de récupération des liants induit une modification de la micro-morphologie de la structure polymère (phénomène de restructuration).

Les autres liants montrent un comportement semblable dans une bande de dispersion relativement importante. De façon analogue aux observations de la pénétration, le vieillissement simulé en laboratoire correspond particulièrement bien avec les observations pratiques.

## 10.1.3 POINT DE RUPTURE FRAASS

Point de rupture Fraass [°C]							
Planches d'essai	N° IMP	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	A96-0113	-18	-16	-11.3	-15	-16	-3
Nr. 2	A96-0114	-15	-10	-6.3	-12	-8	0
Nr. 3	A96-0115	-27	-18	-10.8	-21	-19	-7
Nr. 4	A96-0116	-19	-17	-9.2	-16	-14	-2
Nr. 5	A96-0117	-19	-17	-11.0	-17	-17	-5
Nr. 6	A96-0118	-25	-18	-11.5	-17	-20	-6
Nr. 7	A96-0119	-19	-22	-9.0	-22	-18	-5
Nr. 8	A96-0120	-24	-21	-5.7	-22	-21	-6
Nr. 9	A96-0121	-23	-19	-7.2	-15	-21	-9
Nr. 11	A96-0124	-20	-21	-9.3	-18	-24	-8
Nr. 14	A96-0127	-25	-19	-12.5	-19	-24	-6
Nr. 15	A96-0128	-20	-20	-10.0	-15	-18	-8
Nr. 16	A96-0129	-17	-15	-6.2	-15	-15	-1

Tableau 32: Vue d'ensemble des résultats de l'essai du point de rupture Fraass

La détermination du point de rupture selon Fraass a été effectuée selon la norme suisse en vigueur lors du projet SN 671 755a.

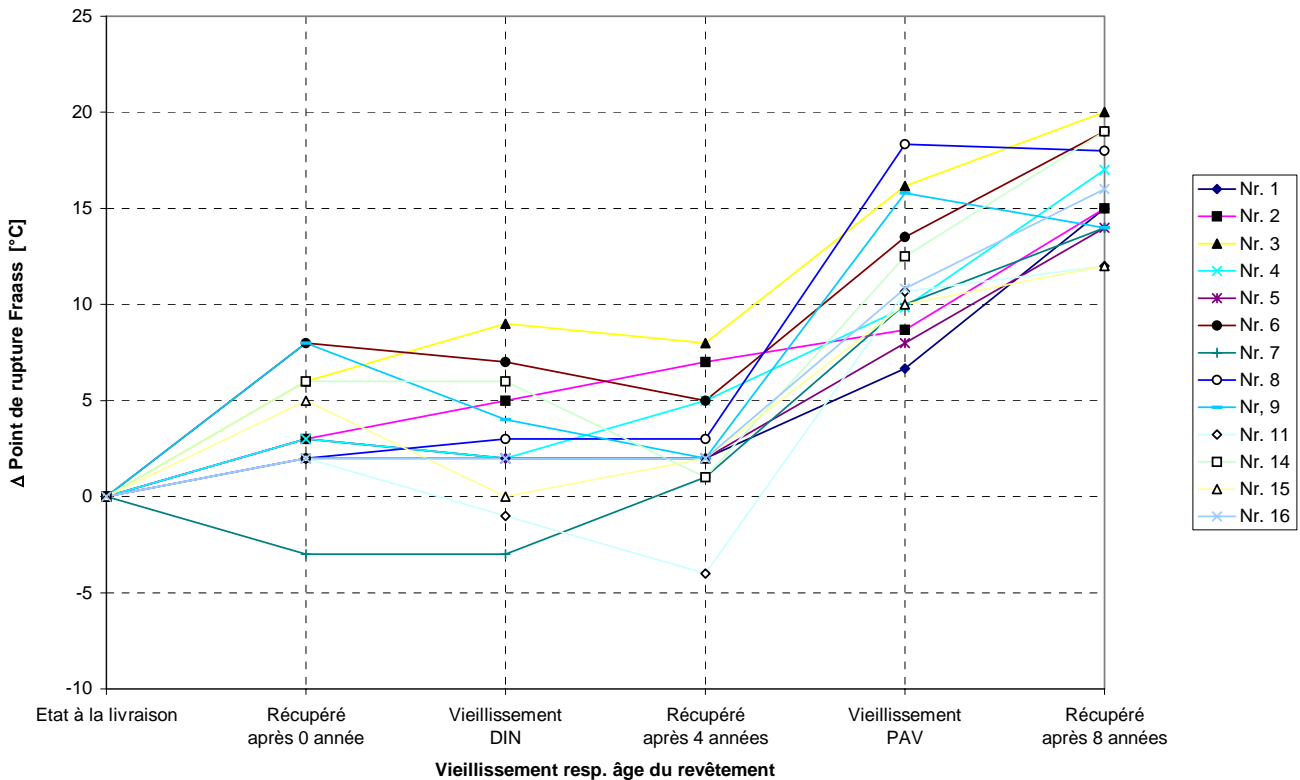


Figure 20: Evolution du point de rupture selon Fraass en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

La Figure 20 ne montre pas les valeurs individuelles du point de rupture selon Fraass, mais uniquement leur variation par rapport aux valeurs obtenues à l'état de livraison.

La détermination du point de rupture selon Fraass peut être contrariée par sa mauvaise reproductibilité (comparaison entre différents laboratoires). Comme la répétabilité de l'essai (différents essais au sein du même laboratoire) est sensiblement meilleure que la reproductibilité, les essais ont été effectués par un seul laboratoire sur toute la durée de ce projet.

Des évolutions très différentes sont à remarquer partiellement pour les Pmb ; cependant une certaine tendance peut être mise en évidence.

Il est également à remarquer que pour le point de rupture selon Fraass, le vieillissement à court terme (DIN) et à long terme (PAV) exécutés en laboratoire correspondent particulièrement bien avec les observations pratiques.

## 10.1.4 RECOUVRANCE ÉLASTIQUE

<b>Recouvrance élastique à 25°C</b>							
[%]							
Planches d'essai	N° IMP	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	A96-0113	14.0	15.0	22.5	12.5	13.8	24
Nr. 2	A96-0114	14.0	15.0	éch. fissuré	15.5	éch. fiss.	éch. fiss.
Nr. 3	A96-0115	78.0	77.0	éch. fissuré	78.0	75.3	69.7
Nr. 4	A96-0116	78.0	70.0	éch. fissuré	58.5	67.3	67
Nr. 5	A96-0117	100.0	91.0	71.8	84.5	81.3	76.7
Nr. 6	A96-0118	97.0	92.0	78.8	89.8	82.5	77.3
Nr. 7	A96-0119	64.0	58.0	éch. fissuré	61.5	59.8	57.7
Nr. 8	A96-0120	30.0	40.0	éch. fissuré	éch. fiss.	éch. fiss.	éch. fiss.
Nr. 9	A96-0121	60.0	58.0	éch. fissuré	éch. fiss.	éch. fiss.	éch. fiss.
Nr. 11	A96-0124	82.0	78.0	56.5	77.3	73.0	68.0
Nr. 14	A96-0127	58.0	61.0	éch. fissuré	61.3	éch. fiss.	éch. fiss.
Nr. 15	A96-0128	15.0	16.0	éch. fissuré	11.5	15.3	13.3
Nr. 16	A96-0129	10.0	12.0	éch. fissuré	12.5	15.0	éch. fiss.

Tableau 33: Vue d'ensemble des résultats de l'essai de recouvrance élastique

La détermination de la recouvrance élastique a été effectuée selon la norme suisse en vigueur SN 671 747.

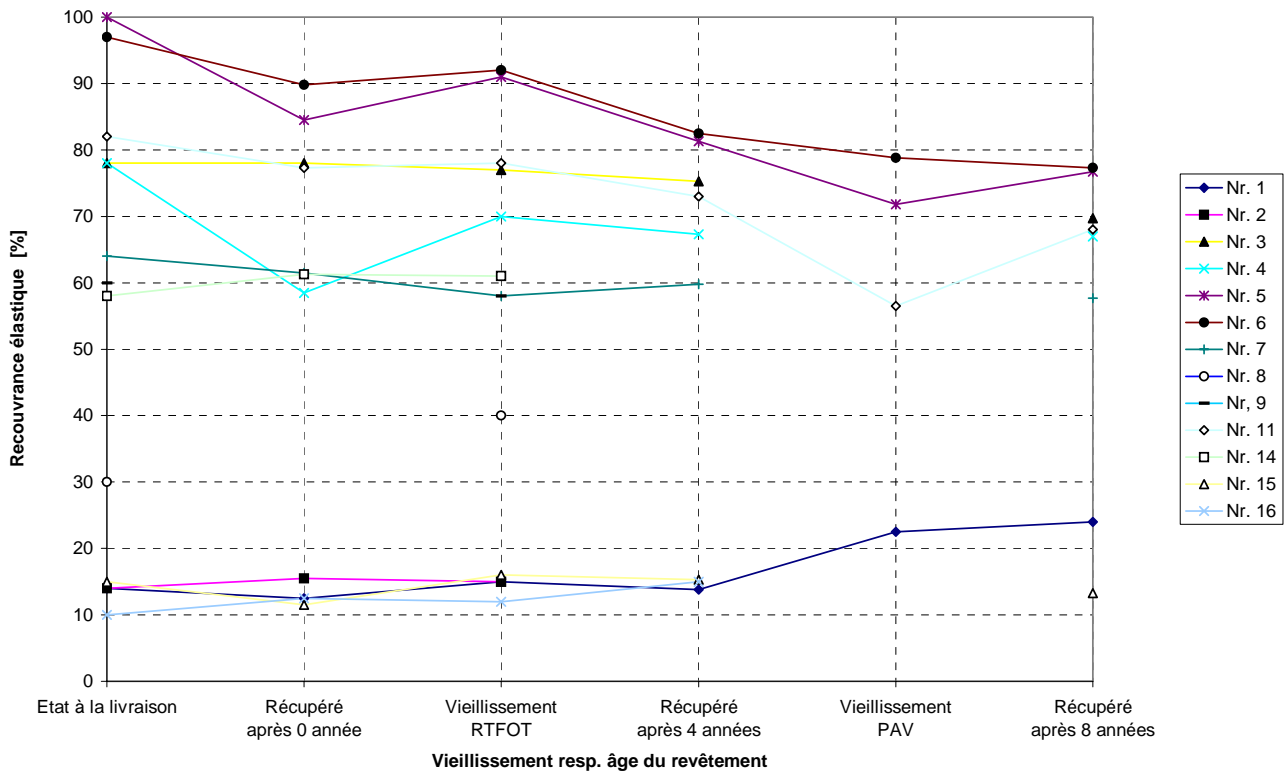


Figure 21: Evolution de la recouvrance élastique en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

Lors de la détermination de la recouvrance élastique, certaines valeurs n'ont pas pu être déterminées, car relativement beaucoup d'échantillons se sont fissurés lors de l'essai.

La méthode d'essai de la recouvrance élastique est avant tout appropriée pour la mise en évidence de la modification avec des élastomères. Au contraire, cette méthode n'est pas utile pour observer le comportement au vieillissement.

## 10.1.5 BENDING BEAM RHEOMETER

<b>Bending Beam Rheometer</b> Rigidité à -15°C et 60 secondes [kPa]							
Planches d'essai	N° IMP	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	A96-0113	101'717	111'433	161'900	132'100	205'167	176'000
Nr. 2	A96-0114	156'800	160'767	219'333	168'900	255'167	287'800
Nr. 3	A96-0115	86'495	-	153'233	110'500	163'067	159'266
Nr. 4	A96-0116	121'100	-	198'833	172'100	232'033	239'700
Nr. 5	A96-0117	90'747	-	153'650	149'300	212'200	225'033
Nr. 6	A96-0118	93'903	-	151'733	136'800	198'867	208'666
Nr. 7	A96-0119	90'667	-	162'100	140'200	211'733	264'133
Nr. 8	A96-0120	89'277	100'223	140'800	123'000	171'067	156'100
Nr. 9	A96-0121	63'350	-	157'733	493'600	271'076	253'333
Nr. 11	A96-0124	125'433	157'700	220'867	120'600	195'200	167'100
Nr. 14	A96-0127	78'707	-	153'733	118'700	186'933	220'033
Nr. 15	A96-0128	128'800	-	196'600	149'100	205'800	234'100
Nr. 16	A96-0129	150'700	-	223'133	195'900	248'033	296'300

Tableau 34: Vue d'ensemble des résultats de la rigidité au Bending Beam Rheometer

Les essais au Bending Beam Rheometer ont été effectués selon la méthode SHRP.

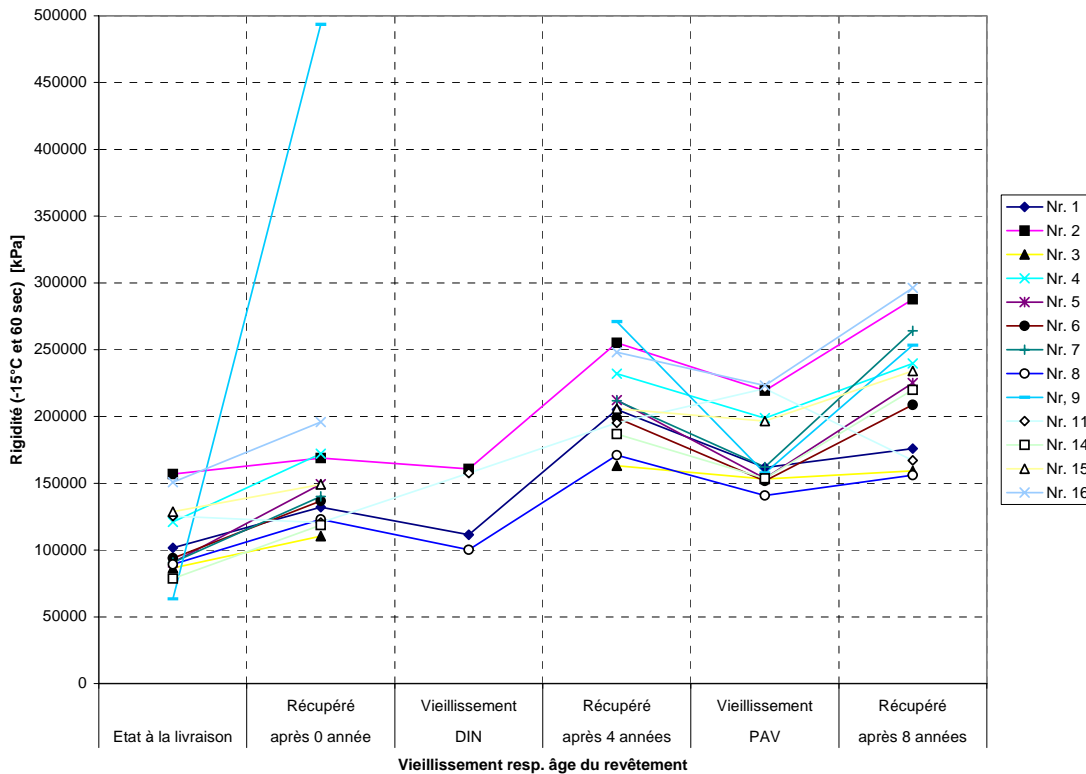


Figure 22: Evolution de la rigidité au Bending Beam Rheometer en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

Les tableaux 34 à 37 et les figures 22 à 25 représentent les résultats obtenus avec le Bending Beam Rheometer. Il s'agit de la rigidité à  $-15^{\circ}\text{C}$  et 60 secondes, de la valeur  $m$  à ces conditions d'essai et les températures pour lesquelles la valeur  $m = 0.3$  est atteinte ainsi que la température pour laquelle la rigidité est de 300 MPa.

La température  $T_{m=0,3}$  corrèle particulièrement bien avec la température de rupture suite aux sollicitations thermiques. La température  $T_{S=300\text{ MPa}}$  corrèle particulièrement bien avec la température pour laquelle un liant obtient la plus grande résistance à la traction.

Les liants des planches N° 8 et 9 se comportent particulièrement différemment des autres Bmp. Il est connu que pour le liant de la planche N° 9, qu'en plus de la modification avec des polymères, des antioxydants ont été également employés. Cette planche de mesure se différencie également totalement des autres planches en ce qui concerne son comportement à long terme (formation de fissures).

Les 4 graphiques montrent une tendance semblable quant à l'influence du vieillissement sur les caractéristiques constatées par le Bending Beam Rheometer.

Bending Beam Rheometer Valeur m à -15°C et 60 secondes						
Planches d'essai	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	0.425	0.389	0.324	0.368	0.321	0.310
Nr. 2	0.383	0.347	0.293	0.324	0.292	0.281
Nr. 3	0.387	-	0.329	0.356	0.321	0.346
Nr. 4	0.388	-	0.295	0.332	0.293	0.294
Nr. 5	0.407	-	0.320	0.363	0.312	0.301
Nr. 6	0.414	-	0.329	0.346	0.322	0.319
Nr. 7	0.409	-	0.314	0.359	0.312	0.297
Nr. 8	0.335	0.294	0.234	0.279	0.246	0.254
Nr. 9	0.402	-	0.296	0.195	0.253	0.267
Nr. 11	0.453	0.413	0.369	0.439	0.363	0.339
Nr. 14	0.422	-	0.320	0.379	0.311	0.299
Nr. 15	0.426	-	0.323	0.377	0.330	0.313
Nr. 16	0.378	-	0.297	0.350	0.307	0.303

Tableau 35: Vue d'ensemble des résultats de la valeur m au Bending Beam Rheometer

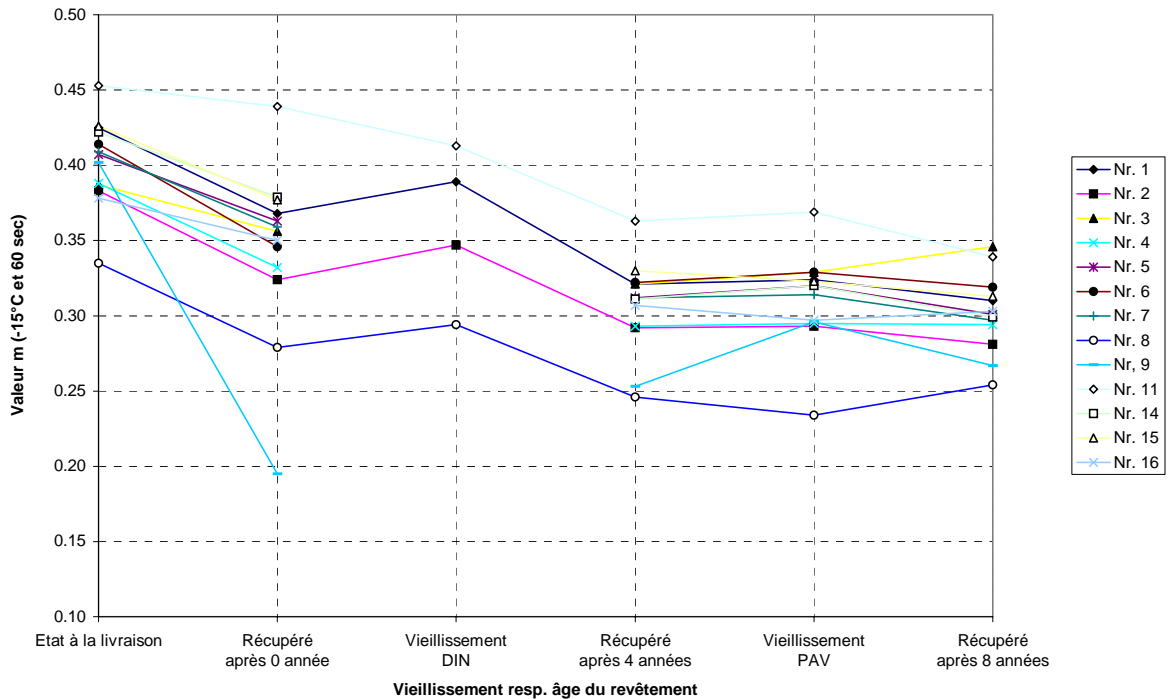


Figure 23: Evolution de la valeur m au Bending Beam Rheometer en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

<p align="center"><b>Bending Beam Rheometer</b> Température pour laquelle la valeur <math>m = 0.3</math></p>						
Planches d'essai	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	-23.2	-	-17.5	-	-17.1	-17.7
Nr. 2	-21.4	-	-14	-	-14.1	-12.3
Nr. 3	-22.5	-	-17.9	-	-17.4	-19.5
Nr. 4	-22.1	-	-14.4	-	-14.2	-14.3
Nr. 5	-21.9	-	-17.1	-	-16.1	-14.0
Nr. 6	-23.6	-	-18.3	-	-17.2	-16.7
Nr. 7	-22.8	-	-17.0	-	-16.4	-14.9
Nr. 8	-19.2	-	0.7	-	-3.4	-5.7
Nr. 9	-26.3	-	-14.4	-	-7.9	-10.5
Nr. 11	-22.9	-	-20.1	-	-19.9	-19.9
Nr. 14	-24.4	-	-17.7	-	-16.1	-14.8
Nr. 15	-22.9	-	-17.6	-	-17.0	-16.1
Nr. 16	-19.1	-	-14.7	-	-15.6	-15.3

Tableau 36: Vue d'ensemble des résultats de  $T_{m=0.3}$  au Bending Beam Rheometer

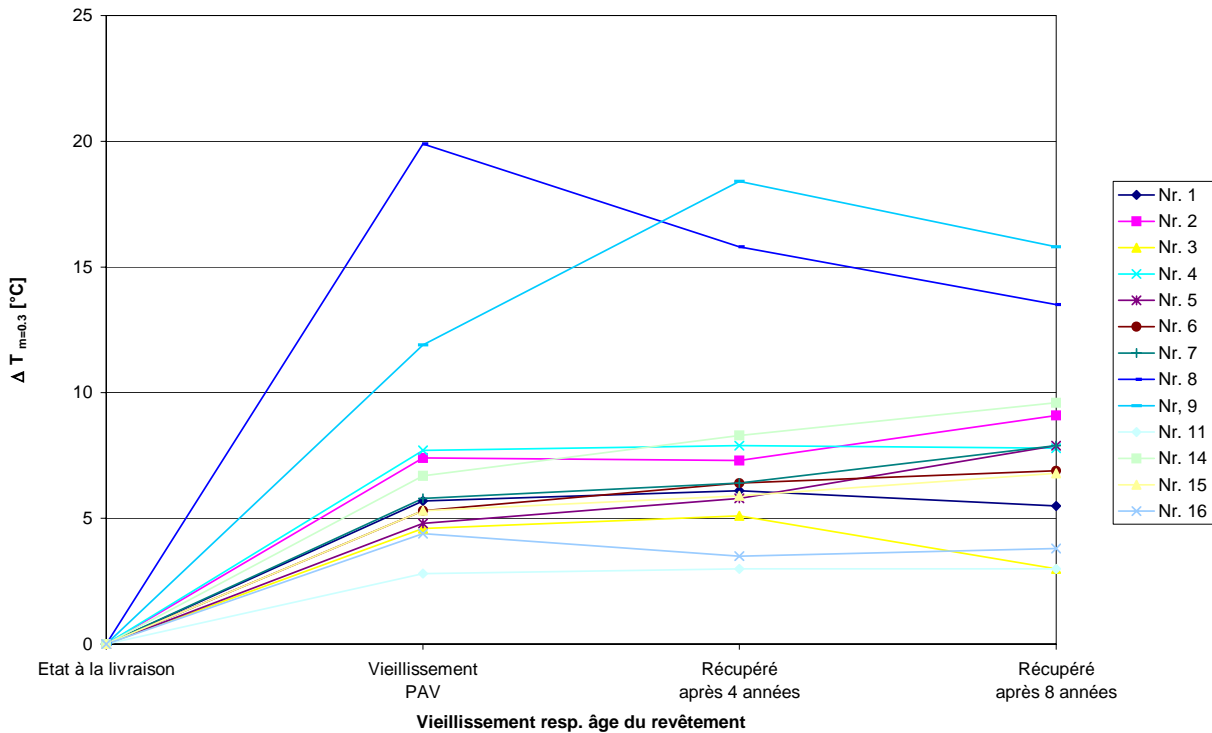


Figure 24: Evolution de la valeur  $T_{m=0.3}$  au Bending Beam Rheometer en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

<p align="center"><b>Bending Beam Rheometer</b> Température pour laquelle la rigidité = 300 MPa</p>						
Planches d'essai	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	-21.7	-	-20.1	-	-18.2	-18.9
Nr. 2	-19.8	-	-17.9	-	-16.6	-15.3
Nr. 3	-23.6	-	-20.5	-	-19.6	-19.2
Nr. 4	-21.6	-	-18.8	-	-17.5	-16.8
Nr. 5	-23.1	-	-20.9	-	-18.4	-17.0
Nr. 6	-23.3	-	-20.6	-	-18.6	-17.7
Nr. 7	-22.3	-	-20.5	-	-18.3	-16.0
Nr. 8	-25.0	-	-28.6	-	-21.3	-21.8
Nr. 9	-25.4	-	-20.3	-	-16.2	-16.3
Nr. 11	-20.1	-	-16.4	-	-18.4	-18.0
Nr. 14	-24.3	-	-21.0	-	-19.3	-17.2
Nr. 15	-20.8	-	-18.5	-	-18.0	-16.6
Nr. 16	-19.2	-	-17.4	-	-17.2	-15.1

Tableau 37: Vue d'ensemble des résultats de  $T_{S=300MPa}$  au Bending Beam Rheometer

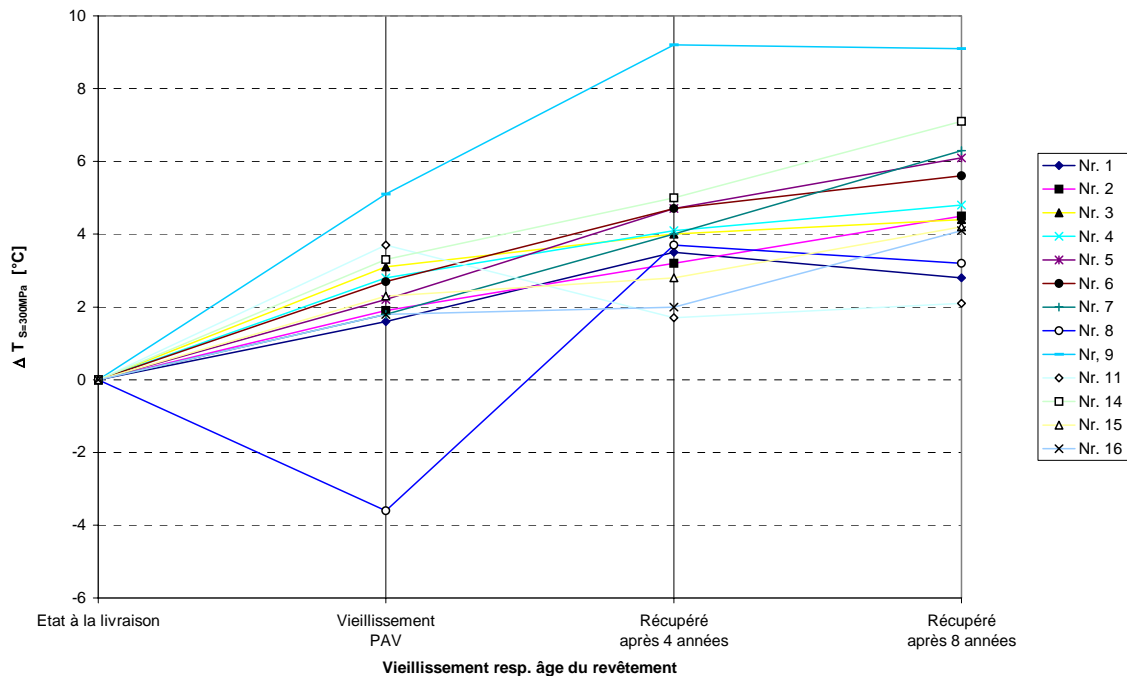


Figure 25: Evolution de la valeur  $T_{S=300MPa}$  au Bending Beam Rheometer en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

## 10.1.6 FORCE – DUCTILITÉ

<p style="text-align: center;"><b>Force - Ductilité</b> Energie jusqu'à la rupture [J/cm<sup>2</sup>]</p>							
Planches d'essai	IMP Nr.	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	A96-0113	4.570	-	4.424	-	0.480	0.650
Nr. 2	A96-0114	4.492	-	4.054	-	0.061	0.110
Nr. 3	A96-0115	8.082	-	11.248	-	10.100	12.400
Nr. 4	A96-0116	13.793	-	éch. fissuré	-	0.170	0.380
Nr. 5	A96-0117	13.348	-	16.121	-	14.000	3.800
Nr. 6	A96-0118	16.384	-	14.071	-	14.700	20.400
Nr. 7	A96-0119	9.125	-	8.031	-	0.530	1.200
Nr. 8	A96-0120	2.863	-	éch. fissuré	-	0.200	0.150
Nr. 9	A96-0121	5.315	-	8.357	-	0.060	0.180
Nr. 11	A96-0124	15.894	-	éch. fissuré	-	9.200	12.300
Nr. 14	A96-0127	5.769	-	7.202	-	1.760	2.700
Nr. 15	A96-0128	4.628	-	éch. fissuré	-	1.110	0.410
Nr. 16	A96-0129	4.720	-	éch. fissuré	-	0.440	0.450

Tableau 38: Vue d'ensemble des résultats de l'essai force - ductilité

L'essai force ductilité a été effectué selon la procédure décrite dans le du mandat de recherche FA 13/99 "Optimisation de l'essai force – ductilité pour les Bmp"

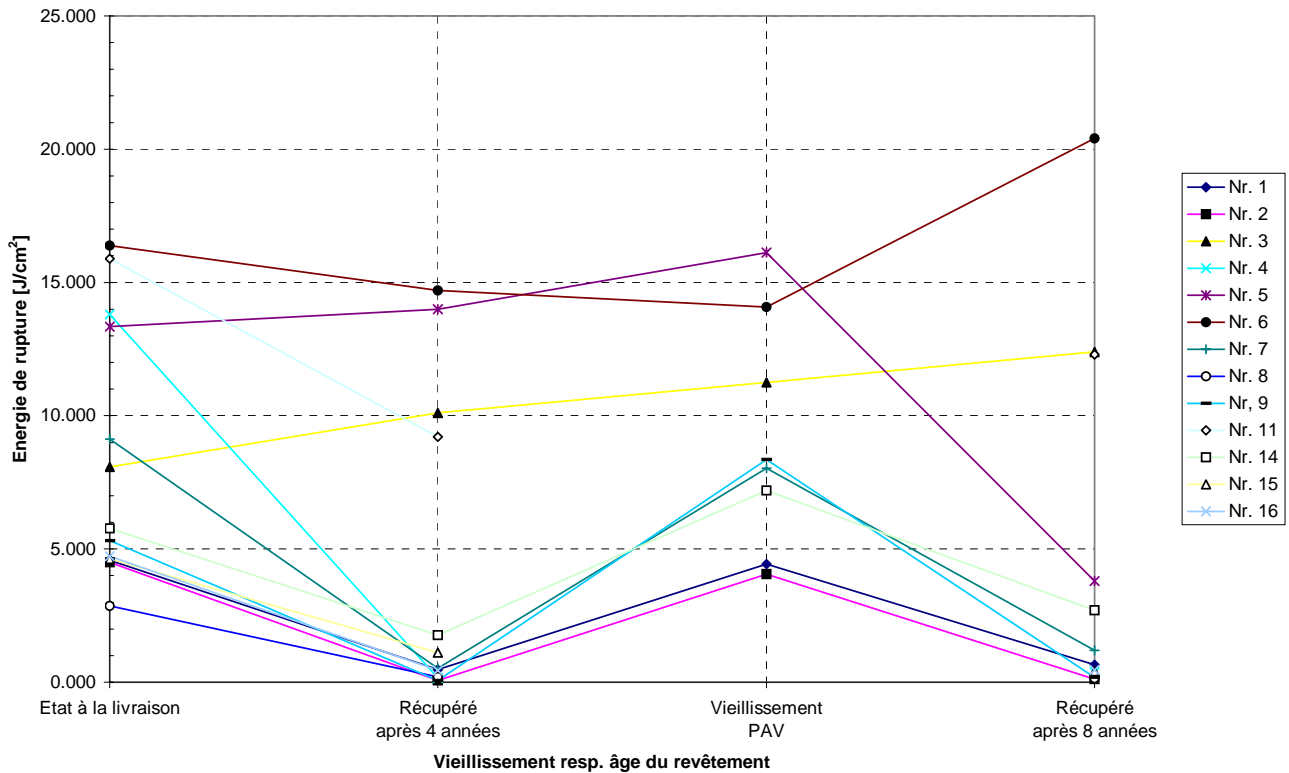


Figure 26: Evolution de l'énergie de rupture à l'essai force – ductilité en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

L'essai de force – ductilité a été développé comme alternative à la recouvrance élastique, pour pouvoir différencier nettement les Bmp modifiés des non-modifiés. Pour cette raison, cette méthode d'essai a été incluse ultérieurement au programme d'essais. Les valeurs après le vieillissement DIN ainsi que pour le bitume récupéré après 0 année manquent, car les liants n'ont pu être obtenus après coup.

Pour les liants des planches Nr. 3, 5 et 6, il est à constater, que les énergies jusqu'à la rupture pour l'ensemble des états de vieillissement sont d'un ordre de grandeur identique. Pour les liants des planches Nr. 1, 2, 7, 9 et 14, les énergies jusqu'à la rupture des liants récupérés sont sur l'ensemble particulièrement plus basses que celles obtenues sur les liants non récupérés (livraison et PAV). Il est possible que la procédure de récupération ait pu modifier les caractéristiques du liant à un tel point, que la pertinence de l'essai en soit réduite. De plus il faut remarquer que dans le cadre de la présente étude, l'énergie de l'essai force – ductilité est calculée jusqu'à la rupture. Dans le cadre du mandat de recherche FA 13/99 "Optimisation de l'essai force – ductilité pour les Bmp" il a pu être déterminé, que l'énergie jusqu'à la rupture comme valeur de mesure n'est pas suffisamment pertinente. Pour cette raison, dans la nouvelle norme SN 670 548 "Liants bitumineux, Force - ductilité" un autre procédé pour le calcul de l'énergie a été proposé.

## 10.2 CARACTÉRISATION CHIMIQUE DU VIEILLISSEMENT DES BITUMES ET BITUMES POLYMÈRES PAR IRTF

### 10.2.1 GÉNÉRALITÉS

L'appréciation des changements chimiques des Bmp à la suite de leur vieillissement, en se basant sur les résultats obtenus au IRTF, a été effectuée par Monsieur C. Grimm, ingénieur-chimiste EPFZ. Dans ce chapitre est présenté le résumé d'un travail accompli par Monsieur Grimm en janvier 2000 mais non publié.

#### 10.2.1.1 Spectres des constituants purs

- Spectre du bitume:

En règle générale, les spectres des bitumes sont remarquablement constants, quels que soit l'origine et les caractéristiques du bitume, à l'exception de quelques différences dans la zone d'absorption comprise entre 720 et 870  $\text{cm}^{-1}$  (= finger print du bitume) et celle correspondant à l'absorption des liaisons aromatique à la fréquence de 1600  $\text{cm}^{-1}$ .

- Spectre du SBS:

Les spectres des copolymères butadiène-styrène dépendent des quantités relatives de butadiène (BD) et de styrène (St). Les SBS modificateurs du bitume sont pour la plupart constitués de 20 à 30% de styrène et de 70 à 80% de butadiène.

Les bandes d'absorption se trouvent à 700  $\text{cm}^{-1}$  pour le styrène et à 966  $\text{cm}^{-1}$  pour le butadiène.

- Spectre de l'APP:

Le polypropylène atactique présente un spectre plus proche de celui du bitume, ce qui est dû à leur composition hydrocarbonée aliphatique commune. Les absorptions à 1160 et 965  $\text{cm}^{-1}$  sont négligeables dans le bitume. L'absorption à 1380  $\text{cm}^{-1}$  (par comparaison avec celle à 1460  $\text{cm}^{-1}$ ) est plus forte dans l'APP que dans le bitume.

Ces trois éléments liés à la forte concentration en groupe  $-\text{CH}_3$  dans l'APP, peuvent donc servir d'indicateur de la présence d'APP dans le bitume (vibrations de déformation en dehors du plan de  $\text{CH}_3$  à 1160  $\text{cm}^{-1}$ ).

- Spectre de l'EVA:

Pour la modification des bitumes routiers, on utilise généralement des copolymères, dont le taux d'acétate de vinyle est de 30 % environ (EVA: Copolymère éthylène acétate de vinyle).

Les bandes d'absorption à 1740, 1245 et 1030  $\text{cm}^{-1}$  sont dues au copolymère acétate de vinyle, tandis que celles situées à 1460 et 720  $\text{cm}^{-1}$  sont issues du polyéthylène.

- Spectre de l'EPDM:

L'EPDM (Terpolymère éthylène-propylène diène-monomère avec 5-éthylidène-norbornène comme composant diène) est un terpolymère d'éthylène propylène et diène.

Leurs propriétés essentielles résident dans leur bonne résistance au vieillissement vis-à-vis de l'ozone, de par leur structure très saturée, et vis-à-vis de la chaleur.

On peut se servir indirectement des spectres des composants éthylène et propylène, dont la superposition des deux devrait permettre de distinguer la et les bandes, auprès desquelles l'absorption dû au bitume est négligeable. Manifestement, on s'aperçoit que le bande à  $1160\text{ cm}^{-1}$  due au polypropylène, peut servir d'indicateur de la présence d'EPDM dans le bitume.

- Spectre des polyoléfines:

Il s'agit également d'une famille de polymères, dont la polymérisation est modulée suivant les proportions respectives de chaque monomère, avec comme résultat différents types de polyoléfines.

Suivant le type de polyoléfine incorporée au bitume (planches nos 7 et 10), la bande d'absorption servant d'indicateur de la présence du polymère peut changer. Selon le cas de figure, on trouve le repère à  $1160\text{ cm}^{-1}$  ou à  $965\text{ cm}^{-1}$ .

### 10.2.1.2 Spectres des mélanges bitumes-polymères et ajouts

- Mélanges bitume-SBS:

La comparaison des spectres du bitume avec ceux du SBS permet de tirer les conclusions suivantes:

- Le SBS à 30% de styrène présente un spectre très nettement différent de celui du bitume. Les plus importantes sont situées à env.  $966$ ,  $911$  et  $700\text{ cm}^{-1}$ . Ces bandes, en particulier celle à  $966\text{ cm}^{-1}$ , peuvent donc servir de témoins de la présence de SBS dans le bitume.

- Mélanges bitume-APP:

La bande à  $966\text{ cm}^{-1}$  peut être choisie comme témoin de la présence d'APP dans le bitume.

- Mélanges bitume-EVA:

Il y a superposition des bandes respectives d'absorption du bitume et de l'EVA pour les domaine de fréquence vers  $720\text{ cm}^{-1}$ ,  $1030\text{ cm}^{-1}$  et  $1460\text{ cm}^{-1}$ . Seules les bandes à  $1245\text{ cm}^{-1}$  et  $1740\text{ cm}^{-1}$  permettent de repérer ce dernier. Pour simplifier, on ne retiendra que celle à  $1740\text{ cm}^{-1}$ .

- Mélanges bitume-EPDM:

En comparant les spectres du polyéthylène, du polypropylène et du bitume, on remarque qu'une seule bande à  $1160\text{ cm}^{-1}$  peut servir de témoin.

- Mélanges bitume-polyoléfine:

On est en présence de deux cas de figure:

Planche n° 7: c'est la bande à  $966 \text{ cm}^{-1}$  qui peut servir de témoin de la présence de polymère de type polyoléfine.

Planche n° 11: c'est la bande à  $1160 \text{ cm}^{-1}$  qui retient l'attention.

### 10.2.1.3 Les traitements des liants pour simuler :

- le vieillissement à court terme (pendant la construction de la chaussée)
  - le vieillissement à long terme (pendant les cinq années de la durée de vie de la chaussée)
- sont respectivement le RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) et le PAV (Pressure Ageing Vessel). Le vieillissement à court terme est obtenu par RTFOT. Le vieillissement à long terme est obtenu successivement par RTFOT, puis PAV (vieillissement sous pression d'air).

Si l'essai de vieillissement artificiel RTFOT simule correctement le vieillissement du bitume à l'enrobage en centrale, il n'en est pas de même pour la simulation du vieillissement sur route.

Dans le cadre du programme de recherche américain SHRP sur de nouvelles spécifications, un essai de simulation du vieillissement des bitumes a été mis au point: le Pressure Ageing Vessel. Les bitumes, après avoir subi l'essai de RTFOT sont placés dans une enceinte à  $100 \text{ °C}$  sous une pression de 20 bars pendant 20 heures. Cet essai est censé simuler un vieillissement in situ durant les cinq premières années de service.

## 10.2.2 ANALYSE DES RÉSULTATS

On propose dans les tableaux 10-11 et 10-12 de l'annexe 8, deux types d'exploitation des différents pics d'identification des polymères et ajouts:

- a) Mesure de l'aire spécifique des bandes respectives d'absorption

Cette mesure est en principe effectuée du point le plus bas d'une vallée au point le plus bas de l'autre vallée de part et d'autre de la bande. Les points bas sont reliés par une ligne de base délimitant ainsi l'objet géométrique dont l'aire est à calculer par un intégrateur.

- b) Cas particulier des bitumes-SBS

Dans le cas particulier des signaux enregistrés à  $965 \text{ cm}^{-1}$ , il se trouve que le signal voisin dû aux composés sulfoxydes à  $1030 \text{ cm}^{-1}$  provoque une interférence telle que le signal du SBS devient asymétrique avec formation d'une vallée-plateau entre les deux signaux. Il en résulte un décalage oblique de la ligne de base, de sorte que la mesure de l'aire de la bande à  $965 \text{ cm}^{-1}$  devient aléatoire.

Il est préférable dans ce cas de procéder à une exploitation par la mesure de la hauteur spécifique de la bande à  $965 \text{ cm}^{-1}$ , laquelle est donnée par la perpendiculaire passant par le sommet à la ligne de base.

## c) Mesure de la hauteur spécifique des bandes respectives d'absorption

Les valeurs de la hauteur de pic mesurées à  $965\text{ cm}^{-1}$  permettent, dans le cas des bitumes-SBS, d'obtenir les renseignements suivants sur le vieillissement:

Il s'agit en premier lieu de la concentration résiduelle en SBS après vieillissement. Il est bien évident qu'un SBS chimiquement modifié par saturation des doubles liaisons du groupe transbutadiène, n'est plus pris en compte par la mesure IRTF à  $965\text{ cm}^{-1}$ .

En revanche, il n'est pas certain qu'une fraction de polymère de basse masse moléculaire résultant d'une éventuelle dégradation par fragmentation des chaînes, soit réellement pris en compte dans la méthode IRTF, en particulier quand le polymère est susceptible d'évoluer dans sa structure et donc d'avoir une absorbance spécifique à différentes fréquences non constante. (Voir tableau 10-11 à l'annexe 8)

Comme souligné précédemment sous point 10.2.2 b), les valeurs d'absorbance mesurées à  $965\text{ cm}^{-1}$  pour les bitumes-SBS sont sujettes à caution. Par rapport au liant de base, elles accusent une décroissance non négligeable en fonction des années de service. Cette tendance est nette chez les bitumes-polymères des planches 3, 4 et 11. En revanche, après sollicitation PAV, l'évolution du signal n'est pas très marquée.

Pour les liants à base d'EPDM, le signal témoin de la présence de polymère à  $1160\text{ cm}^{-1}$  n'a pas pu être repéré.

Dans l'ensemble, les signaux enregistrés sur les bitumes-polymères de type polyoléfine sont relativement constants.

S'agissant du bitume-EVA, les valeurs d'absorbance dues au groupe acétate suivent une évolution légèrement décroissante en fonction de l'âge du liant. (Voir tableau 10-12 à l'annexe 8)

Chez les bitumes-SBS, la différenciation due à la teneur en polymère échelonnée à 3 et 5% est assez nette.

Dans l'ensemble, on peut affirmer que la concentration résiduelle en polymère SBS après vieillissement est remarquablement constante.

Il en va de même pour les bitumes-polyoléfine, dont le polymère n'est pas au demeurant susceptible d'évoluer dans sa structure.

Les bitumes-EVA donnent un signal pratiquement constant en fonction de l'âge.

Dans le cas du liant mixte de la planche 12, les signaux servant à l'identification des polymères sont de faible intensité.

### 10.2.3 ÉTUDE DU VIEILLISSEMENT

Les bitumes et bitume-polymères en tant que liant routier subissent sous l'action de l'air, de la lumière et de la température, une dégradation physico-chimique due à une oxydation partielle de certains de leurs constituants.

Deux types de vieillissement sont plus ou moins connus. Le premier, de nature physique, conduit à l'évaporation de fractions légères et cristallisation des paraffines. Le second, de nature chimique, correspond à la formation de composés polaires contenant de l'oxygène.

La spectrométrie infrarouge est une technique privilégiée pour suivre l'augmentation des fonctions oxydées des bitumes. Il est ainsi possible de quantifier les bandes correspondant à chacune des fonctions étudiées, et de calculer ainsi des indices de vieillissement.

#### 10.2.3.1 Indices de vieillissement

En IRTF, les indices structuraux sont obtenus principalement par des rapports d'aires spécifiques à certains groupements chimiques.

L'évolution au cours du vieillissement routier est fondée d'une part sur l'apparition d'espèces telles que:

- les acides carboxyliques
- les cétones
- les anhydrides
- les composés 2-quinolones
- les sulfoxydes aliphatiques

Il s'agit de porter son attention sur les bandes des groupements assorties au tableau 10-13 à l'annexe 8 et de mesurer les aires de celles-ci de vallée à vallée.

Les indices à déterminer sont les suivants:

1. Indice d'oxydation (IO) =  $A_1/\Sigma A_i$
2. Indice sulfoxyde (IS) =  $A_6/\Sigma A_i$

La somme des aires est définie comme suit:

$$\Sigma A_i = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_6 + A_8 + A_9 + A_{10} + A_{11} + A_{12} + A_{13} + A_{14}$$

### 10.2.3.2 Etude du comportement vis-à-vis de l'oxydation

La technique IRTF permet d'appréhender certaines évolutions communes à tous les bitumes au cours d'un essai d'oxydation artificielle (PAV) et in situ au fil des ans.

#### 10-2.3.2.1 Indice d'oxydation et indice sulfoxyde

L'évolution chimique et structurale la plus importante des bitumes se fait durant les quatre premières années: les taux de carbonyles C=O et de sulfoxydes S=O croissent puis se stabilisent, voire décroissent vers une valeur plus faible au bout de huit ans de mise en service.

Au temps  $t = 0$ , on note de manière générale un taux de carbonyle négligeable chez la plupart des bitumes et bitumes-polymères (voir tableau 10-14 à l'annexe 8). Il y a cependant quelques exceptions de taille chez les liants modifiés des planches 7, 9, 14, et dans une moindre mesure, chez celui de la planche 11, lesquels présentent un taux de carbonyles significativement élevé à l'origine.

Dans le cas des liants à base d'EPDM appartenant aux planches 9 et 14, on peut penser que le mode de fabrication par soufflage (incorporation d'air) du mélange bitume-EPDM est à l'origine de cet état de fait.

Au cours du vieillissement par oxydation, le soufre sous forme de sulfides aliphatiques -S- (qui est connu pour ses propriétés antioxydants) est transformé complètement en sulfoxydes. Le bitume devient alors plus sensible à l'oxydation avec une formation simultanée et/ou subséquente de carbonyles, ce qui se traduit par une évolution de son ratio sulfoxydes/carbonyles vers des valeurs plus faibles.

On peut ainsi différencier les bitumes et les bitumes-polymères quant à leur susceptibilité à l'oxydation par l'évolution de leur ratio sulfoxydes/carbonyles de la manière montrée au tableau 10-15 à l'annexe 8.

- évolution du ratio vers des valeurs plus faibles

Il s'agit des bitumes les plus sensibles à l'oxydation avec une formation importante de carbonyles par rapport au taux de sulfoxydes au cours du vieillissement.

L'examen du tableau 10-15 à l'annexe 8 permet d'affirmer que les liants des planches 1, 15 (B 80/100), 2, 16 (B60/70), avec une exaltation du phénomène dans ce dernier cas, ainsi que ceux des planches 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 12 appartiennent à cette catégorie.

- évolution du ratio vers des valeurs plus élevées

Il s'agit des bitumes les moins sensibles à l'oxydation.

Les bitumes-polymères de la planche 11 avec une exaltation du phénomène pour le bitume-polymère de la planche 11, en est l'illustration.

- pas d'évolution notable du ratio

Dans ce cas, le taux de sulfoxydes est relativement proportionnel au taux de carbonyles formés.

Les bitumes-polymères des planches 9 et 14 (bitumes-polymères à base d'EPDM) appartiennent à cette catégorie.

#### 10-2.3.2.1 Comparaison des indices IS/IO obtenus après vieillissement artificiel (RTFOT et PAV) et sur site

Dans le tableau 10-16 à l'annexe 8, on a reproduit les indices IS et IO obtenus après vieillissement suivant l'essai PAV et après 4 années de mise en service. Dans la colonne de droite, on a calculé la valeur des écarts en pourcentages inférieurs (signe -) ou supérieurs (signe +) par rapport au vieillissement in situ après 4 ans.

Dans l'ensemble, on constate des écarts importants, de l'ordre de -20 à -40% pour les quatre bitumes purs des planches 1, 2, 15 et 16.

Pour les bitumes modifiés, ces écarts se réduisent quelque peu, mais demeurent significativement importants, soit par défaut (-) (voir planches 3, 4, 7, 14), soit par excès (+) (voir planche 5), soit tous les deux selon l'indice considéré (voir planche 11). (Voir tableau 10-16 à l'annexe 8).

Il est donc une évidence qui s'impose, à savoir que le vieillissement in situ des bitumes et des bitumes-polymères n'est pas essentiellement dû à des réactions d'oxydation. On peut penser que tous les facteurs qui contribuent au vieillissement des bitumes sur route comme le climat, le trafic, les rayons UV et les variations thermiques dues aux différences de température entre le jour et la nuit, ne sont pas reproduits dans l'essai PAV, quand bien même ils ont une importance non négligeable.

## 10.2.4 CONCLUSIONS

Le présent rapport est divisé en deux parties.

Dans la première partie, on s'est employé à identifier les différents types de polymères utilisés sur treize planches au total. Ce travail d'identification repose sur la connaissance des spectres IRTF des constituants (bitume, polymères, ajouts) d'une part, et sur le choix de bandes d'absorption spécifiques de chaque constituant (bande témoin dans les mélanges bitume-polymères et ajouts).

C'est ainsi que pour chaque famille de polymères, une bande d'absorption spécifique à la famille a pu à tout le moins être choisie comme témoin de la présence de polymère dans le bitume.

Hormis une famille de polymère (EPDM des planches 9 et 14), l'identification a pu être menée à bien par la mesure de l'aire et/ou de la hauteur spécifique des bandes respectives d'absorption. Dans un cas de figure (bitume-SBS), on a montré qu'il était préférable de mesurer la hauteur du pic.

De cette façon, la différenciation des bitumes-SBS à teneur en polymères échelonnée a été mise en évidence.

Dans l'ensemble, pour pratiquement toutes les familles de polymères ayant fait l'objet d'une mesure, l'évolution de la bande-témoin en fonction de l'âge ou de la sollicitation PAV s'est révélée peu importante, voire quasi inexistante, ce qui tendrait à prouver que la concentration résiduelle en polymère après vieillissement artificiel ou sur site est relativement constante.

La seconde partie est consacrée à l'étude du vieillissement de nature chimique du composant bitume uniquement.

Pour mieux apprendre les réactions chimiques mises en jeu, au cours des oxydations artificielles et in situ, des indices de vieillissement ont été déterminés à partir des spectres obtenus sur le liant originel, sur le liant vieilli artificiellement (RTFOT+PAV) ainsi que sur les liants récupérés après 4 et 8 ans de mise en service.

En IRTE, certains indices structuraux sont obtenus principalement par des rapports d'aires spécifiques à certains groupements d'atomes qui apparaissent ou disparaissent au cours du vieillissement, dont les principaux sont respectivement les composés carbonylés et sulfoxydes.

La reconnaissance des bandes à relever étant faite, on a déterminé les indices de vieillissement suivant:

- indice d'oxydation IO
- indice sulfoxyde IS

Ce sont les indices dont on se sert pour mesurer quantitativement l'apparition des composés carbonylés et la transformations des composés sulfides aliphatiques -S- en composés oxydés sulfoxydes.

L'évolution chimique et structurale la plus important commune à tous les bitumes et bitumes-polymères est décrite par la variation du taux de carbonyles, mesuré par l'indice d'oxydation, et du taux de sulfoxydes, mesuré par l'indice sulfoxyde.

Durant les quatre premières années ces taux croissent de manière significative, puis se stabilisent et/ou régressent au bout de huit années.

On a montré à cet égard qu'il est possible de différencier les bitumes et bitumes-polymères quant à leur susceptibilité à l'oxydation par l'évolution de leur ratio taux de sulfoxydes / taux de carbonyles: les bitumes les plus sensibles à l'oxydation sont ceux dont le ratio évolue vers des valeurs plus faibles au cours du vieillissement artificiel (PAV) ou in situ.

Au contraire, les liants , dont le ratio évolue vers des valeurs croissantes sont ceux qui en principe sont le moins sensibles aux phénomènes d'oxydation et donc présentent une bonne tenue au vieillissement.

La comparaison des indices sulfoxydes et indices d'oxydation obtenus après l'essai de vieillissement artificiel (RTFOT+PAV), censé simuler un vieillissement de 5 ans, et sur site après quatre ans, indique une certaine inadéquation entre l'essai et la réalité.

# CHAPITRE 11 ETUDE APPRONFONDIE THERMOMECHANIQUE DES ENROBÉS

## 11.1 INTRODUCTION

Les éléments qui sont présentés dans ce chapitre proviennent du travail de thèse entrepris au LAVOC par T.Pucci, mené en parallèle à cette étude des planches comparatives, et dont le titre était "Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux" (24).

L'étude expérimentale de la fissuration des enrobés bitumineux aux basses températures passe par l'introduction de la température comme paramètre de sollicitation. Dans le cadre du programme américain SHRP, Vinson (30) a recensé les essais de caractérisation du comportement à basse température des enrobés bitumineux. L'essai de retrait thermique empêché sur enrobé a été utilisé comme outils de validation du BBR issu du programme SHRP; l'essai, qui se nomme TSRST, est considéré par Vinson comme l'essai accéléré simulant le mieux les conditions de sollicitations thermiques des couches d'enrobés bitumineux en place dans les chaussées routières.

## 11.2 PRÉSENTATION DE L'ESSAI DE RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ

Monismith et al. (21) est l'initiateur des premières recherches menées en laboratoire dont l'objet était de simuler le couplage thermomécanique à basse température auxquelles sont soumis les enrobés bitumineux dans les chaussées routières. Le principe de l'essai consiste à maintenir une éprouvette d'enrobé bitumineux à une longueur constante et à mesurer la force qu'il faut exercer à cet effet lors d'une diminution de la température. Dans les années huitantes, le professeur Arand en Allemagne a repris le principe de l'essai en y ajoutant des jauges de déplacement qui mesurent et transmettent la déformation longitudinale de l'éprouvette à un moteur pas à pas ; ce moteur rétablit instantanément la longueur initiale de l'éprouvette durant la phase de refroidissement (12).

L'Université d'Etat de l'Oregon aux U.S.A a développé et exploité, sous mandat SHRP, un essai de retrait thermique empêché appliqués sur des éprouvettes d'enrobés bitumineux. Cet essai, qui reprend le principe développé par Arand, se nomme "Thermal Stress Restrained Specimen Test" ou TSRST (Figure 27). L'éprouvette d'enrobé prismatique de dimension normalisée de 51x51x254mm, est collée entre deux plateaux à l'intérieur d'une enceinte thermique. Le plateau inférieur est relié à une cellule de force et le plateau supérieur est relié à un moteur pas à pas qui maintient l'éprouvette à une longueur constante durant la phase de refroidissement. La régulation du moteur pas à pas se fait sur la valeur moyenne de deux capteurs LVDT placés de part et d'autre du plateau inférieur et sur lesquels viennent se poser deux barres en invar reliées au plateau supérieur. La chambre thermique est refroidie par un système d'azote liquide ou d'air comprimé pulsé à l'intérieur de l'enceinte. L'équipement permet d'effectuer des essais à des vitesses de refroidissement constantes entre  $-2^{\circ}\text{C}/\text{heure}$  et  $-10^{\circ}\text{C}/\text{heure}$ , cela dans une gamme de température de  $+20^{\circ}\text{C}$  à  $-50^{\circ}\text{C}$ .

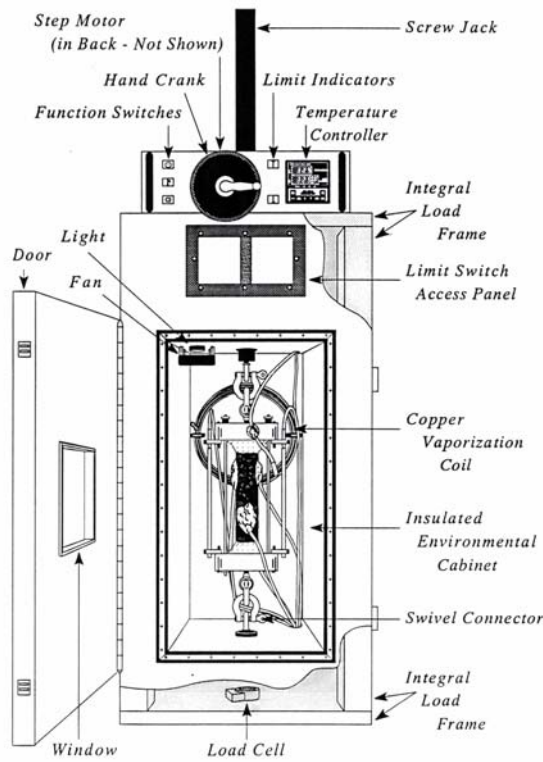
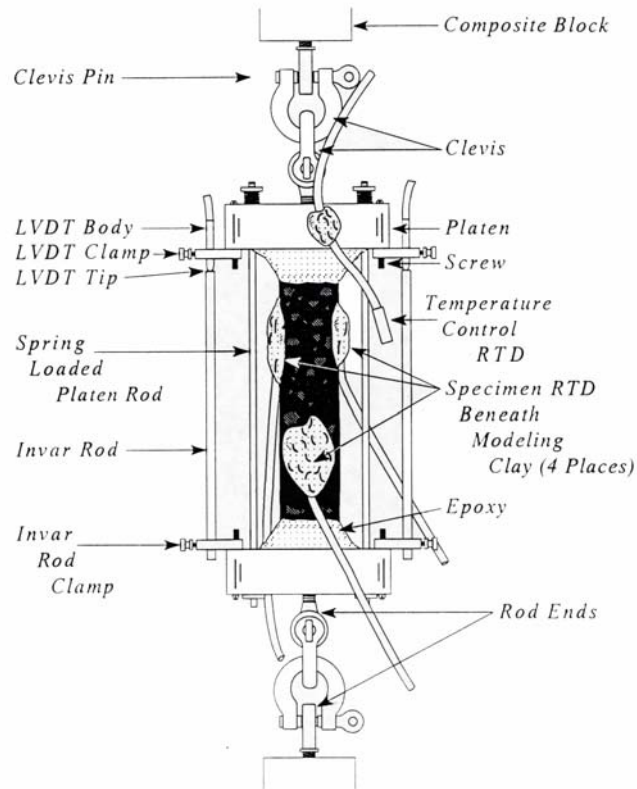


Figure 27: Schéma du TSRST

## 11.3 RESULTATS TYPE DE L'ESSAI ET RÉFÉRENCES PREVISIONNELLES

La Figure 28 présente un résultat type d'un essai de retrait thermique empêché.

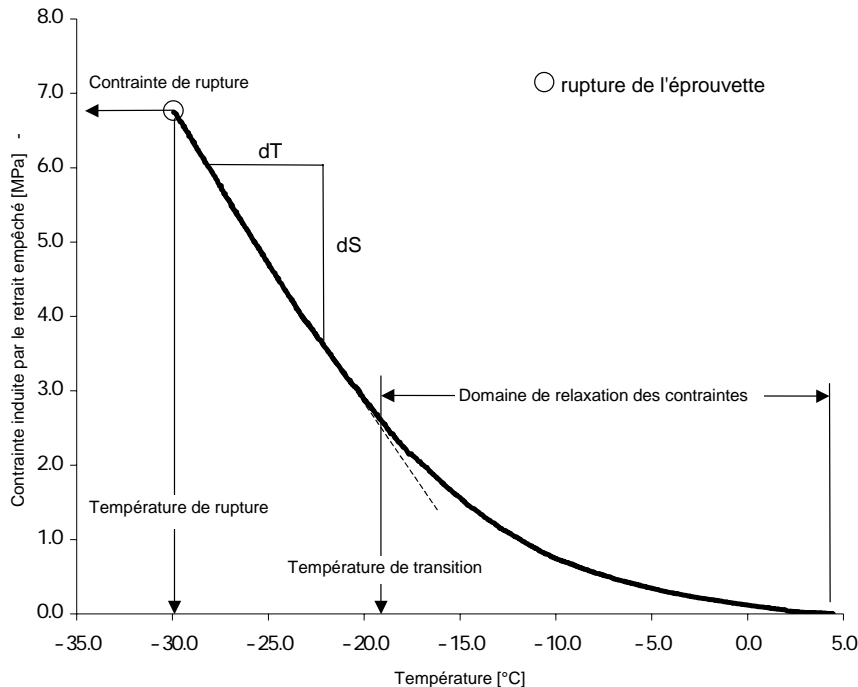


Figure 28: Résultat type de l'essai de retrait thermique empêché à  $-10^{\circ}\text{C}/\text{heure}$

L'essai fournit les caractéristiques suivantes:

- la température de rupture de l'éprouvette ( $\theta_{\text{rupture}}$ )
- la contrainte de rupture de l'éprouvette ( $\sigma_{\text{rupture}}$ )
- la pente de l'évolution de la contrainte ( $ds/dT$ ) en phase "linéaire"
- la température de transition ( $\theta_T$ ) qui définit la limite, dans les conditions de sollicitations de l'essai, à partir de laquelle la courbe d'évolution de la contrainte devient linéaire

L'essai TSRST a été validé in situ par l'analyse de cinq sections routières en Alaska, en Pennsylvanie, et en Finlande (31). Les résultats du TSRST ont été comparés à des indices de fissuration caractérisés par la fréquence des fissures transversales. L'ensemble des sections testées présente des températures en surface de l'ordre de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $-25^{\circ}\text{C}$ . Il apparaît que les résultats des essais TSRST, réalisés sur des éprouvettes de laboratoire ainsi que sur des éprouvettes carottées in situ, ont une bonne correspondance avec les indices de fissuration. Notons que cette validation, basée sur un faible échantillon de population, ne peut fournir une référence satisfaisante et reproductible aux conditions spécifiques de nos climats tempérés.

L'histoire des planches comparatives offre la possibilité de confronter les caractéristiques mesurées en laboratoire, par l'essai de retrait thermique empêché sur les enrobés prélevés in situ après la mise en œuvre, vis-à-vis de l'évolution et de l'état de fissuration de surface de planches comparatives.

## 11.4 ANALYSE DES RESULTATS DES PLANCHES COMPARATIVES

Des essais de retrait thermique empêché, réalisés sur des matériaux prélevés in situ après la mise en œuvre en 1988, ont été réalisés par l'université technique de Munich à l'aide d'un équipement de retrait thermique empêché similaire à l'essai de Arand. Dans la mesure du possible, des éprouvettes prismatiques d'enrobés de 130×40×40mm ont été sciées dans la couche de roulement. Les conditions de l'essai sont : une température initiale de 20°C et un gradient de température de -10°C/h.

A la différence de l'essai TSRST, l'essai réalisé à Munich régule la déformation par une mesure directe prise sur l'éprouvette, cela sur une hauteur de 50mm. Les résultats fournis par l'essai sont la température de transition ( $\theta_T$ ) et la température de rupture ( $\theta_{rupture}$ ). Les résultats se trouvent en annexe.

Ces paramètres sont confrontés à l'année de transition des fissures (c.f. chapitre 7.1.1), donnée par  $I_{transition} = 5\%$ , et à l'état de la fissuration à 10 ans.

### 11.4.1 ANNÉE DE TRANSITION DE LA FISSURATION VERSUS LA TEMPÉRATURE DE TRANSITION DE L'ESSAI DE RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ

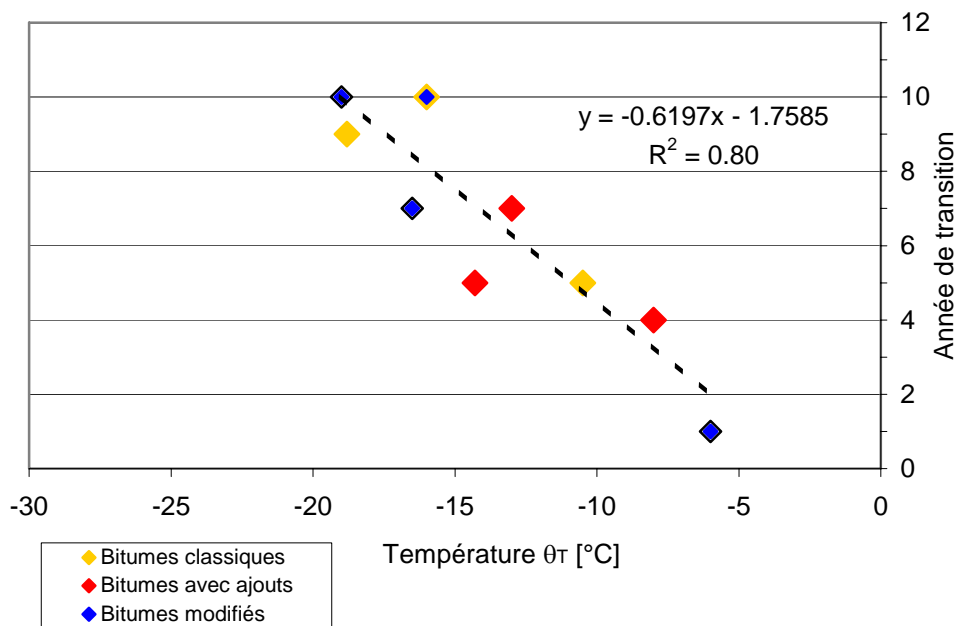


Figure 29: Comparaison de la température  $\theta_T$  vs l'année de transition

Les planches retenues pour l'année de transition sont celles qui ont atteint ou dépassé la valeur de l'indice  $I_{transition} = 5\%$  au plus tard à 10 ans. Les planches 15 et 6 n'ont pas atteint cette valeur mais, à l'aide d'une projection linéaire, leur année de transition respective est estimée à 15 ans. Introduisons ce résultat dans la comparaison présentée par la Figure 29 et observons que la projection des planches 15 et 6 est cohérente vis-à-vis de la tendance générale (Figure 30).

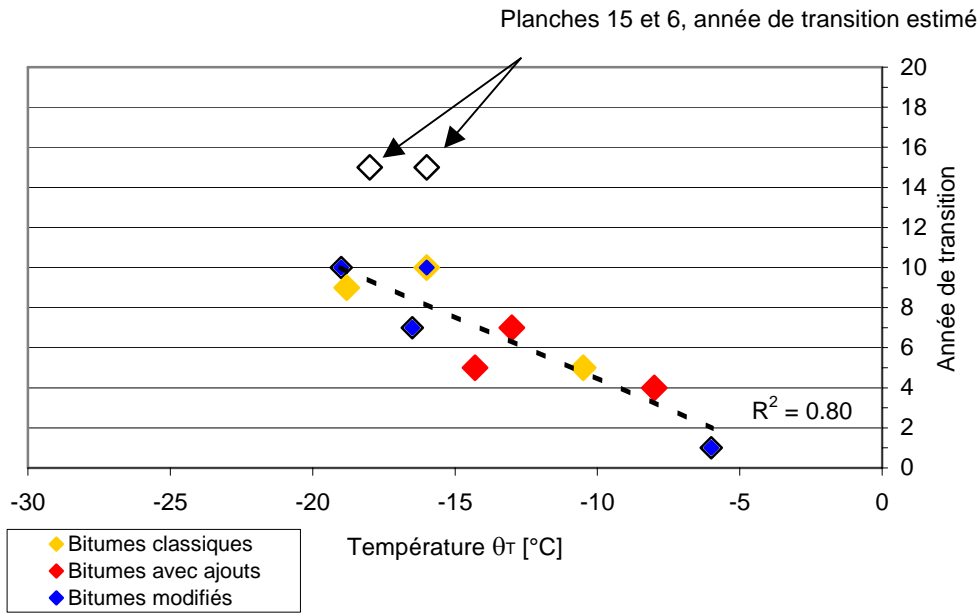


Figure 30: Comparaison de la température  $\theta_\tau$  vs l'année de transition (bis)

#### 11.4.2 INDICE DE FISSURATION À 10 ANS VERSUS LA TEMPÉRATURE DE TRANSITION DE L'ESSAI DE RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ

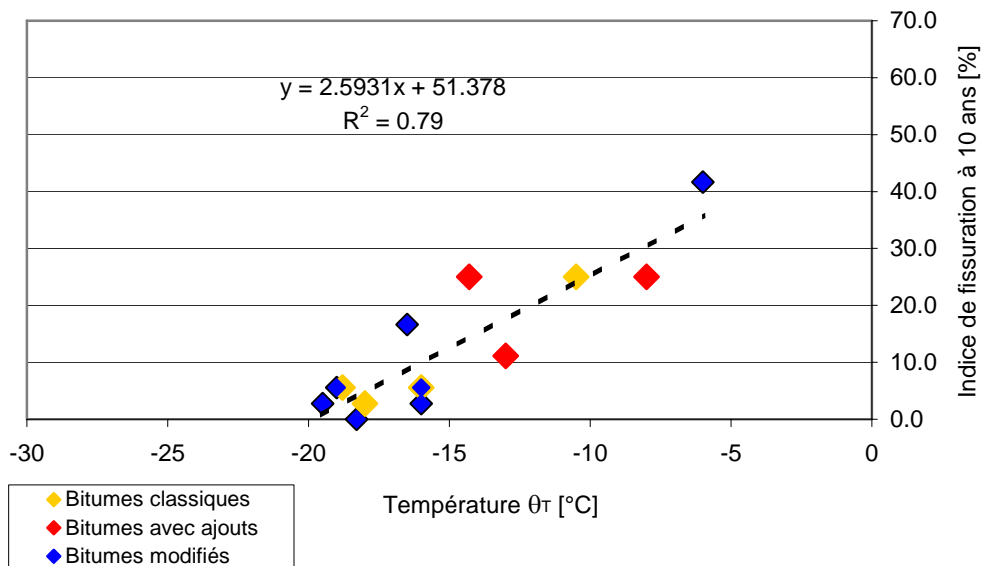


Figure 31: Comparaison de la température  $\theta_\tau$  vs indice de fissuration à 10 ans

## 11.5 CONSIDÉRATIONS SUR LES ASPECTS THERMOMECHANIQUES

L'analyse des essais de retrait thermique empêché permet les constatations suivantes :

- Après la mise en œuvre des enrobés, la température de transition  $\theta_T$  est une caractéristique rhéologique pertinente vis-à-vis des phénomènes de fissuration des planches comparatives. Cet indicateur donne, d'une part, un coefficient de corrélation  $R^2=0,80$  par rapport à l'année de transition de la fissuration, et, d'autre part, un coefficient de  $R^2=0,79$  par rapport à l'état de la fissuration à 10 ans.
- A contrario, la température de rupture des essais après la mise en oeuvre ne donne pas satisfaction, les coefficients sont  $R^2=0,37$  vis-à-vis de l'année de transition et  $R^2=0,51$  vis-à-vis de l'état de fissuration à 10 ans (résultat non présenté dans ce rapport, c.f. (24)).
- De même, les résultats des essais TSRST réalisés sur les matériaux prélevés à 8 ans ne donnent aucune indications vis-à-vis de la fissuration de surface des planches comparatives.

Les résultats mettent en évidence la bonne correspondance entre la température de transition obtenue, sur les enrobés prélevés après la mise en oeuvre, et la fissuration observée in situ dans les 10 années qui ont suivi. Jung et Vinson (20) mentionnent que la température de transition peut jouer un rôle important dans le comportement des enrobés soumis aux basses températures. A notre connaissance, aucune étude ne relate ce critère vis-à-vis de la fissuration réelle observée in situ.

Ainsi, le suivi des planches comparatives et la réalisation d'essais de retrait thermique empêché sur les enrobés prélevés après la mise en œuvre, montrent que la température de transition, déduite de l'essai de retrait thermique empêché, est une propriété rhéologique pertinente dans l'optique d'une approche prévisionnelle de la fissuration thermique des chaussées routières. Cette constatation a été retenue et développée dans le travail de thèse mentionné dans ce chapitre.

## CHAPITRE 12 CONCLUSIONS GÉNÉRALES

### Conclusions sur le comportement :

En suivant le comportement sur 10 ans nous pouvons faire les constatations suivantes:

- a. Globalement, les planches se sont bien comportées sur le long terme. Elles n'ont nécessité aucunes mesures d'intervention 14 ans après leur mise en service (selon le dernier relevé visuel effectué et dont les résultats seront publiés ultérieurement). De plus, les planches qui ont subi une fissuration prématurée (planche 8 et 9) n'ont pas été réparées et sont restées à un niveau de service acceptable pour les usagers. Notons encore que les planches comparatives, présente un excellent comportement vis-à-vis de l'orniérage, mais rappelons qu'elles sont soumises à un trafic relativement faible.
- b. Un liant modifié au SBS (planche n° 11) présente une remarquable résistance à la fissuration. Alors que tous les autres sont dégradés à divers degrés, ce produit n'a aucune fissure détectable après 10 ans de service.
- c. Quatre autres liants ont un comportement très bon dont 3 à base de bitume polymères (planches 3, 6 et 7), et un quatrième est tout simplement un B80/100 de distillation directe (planche n° 15).
- d. Les liants polymères des planches 3 à 6 sont de la même provenance et sont élaborés par une seule et même entreprise et leur comportement est bon. Ni la dureté du bitume de base (80/100 ou 40/50), ni la teneur en SBS (3 % ou 5 %) ne permettent d'établir clairement un classement. En fait, on constate globalement que les cinq bitumes polymères au SBS et celui au polyoléfine à 6 % présentent une bonne résistance à la fissuration.
- e. Les liants classiques (planches 1, 2, 15 et 16) se comportent plutôt bien et sont dans plusieurs cas aussi performants que des bitumes modifiés. Une très nette différence est constatée entre les bitumes de distillation directe d'origine française (planches 15 et 16) et les bitumes semi-soufflés d'origine suisse (planches 1 et 2). Un même classement évident est en faveur des bitumes 80/100 (planches 1 et 15) par rapport aux bitumes 60/70 (planches 2 et 16).
- f. Globalement dans les 3 cas (planches 10, 12 et 13), où un ajout est introduit pendant le processus de malaxage de l'enrobé, les résultats ne sont pas bons et après 10 ans, le taux de fissuration reste en croissance.
- g. Dans 2 cas, le bitume modifié (planche 8 à l'EVA et planche 9 à l'EPDM a été additionné d'un autre produit (respectivement polyisobutylène et agent oxydant) qui ont donné un comportement catastrophique avec une propagation de fissures déjà après une année.

### Conclusions sur l'aspect économique :

Il apparaît que le surcoût d'un bitume "modifié" n'est pas amorti par un meilleur comportement. La situation sur le marché des liants s'étant considérablement modifiée, l'analyse économique reste à actualiser pour en tirer des tendances générales.

**Conclusions sur les aspects prédictifs des essais de laboratoire :**

L'analyse des corrélations issues des résultats des essais sur les liants et les enrobés vis-à-vis de l'ampleur de la fissuration à 10 ans permet les conclusions suivantes:

- a. Pour l'ensemble des liants, y compris les 8 et 9, l'ampleur de la fissuration à 10 ans est en adéquation avec l'essai BBR (caractéristique mesurée par la pente  $m$  de la courbe de charge à  $-15\text{ °C}$  et après 60 s) sur les liants récupérés après leur mise en œuvre. Il en est de même de l'évolution de la viscosité mesurée à  $150\text{ °C}$  et  $130\text{ °C}$  à la livraison et la mise en œuvre.
- b. En soustrayant les planches 8 et 9, ces corrélations ne se retrouvent pas. Ainsi, le mauvais comportement observé par la suite de ces 2 bitumes peut être mis en évidence par l'analyse des liants ayant subi un vieillissement thermique en centrale et à la mise en œuvre par le biais des essais précités.
- c. L'analyse des corrélations sur les liants purs montre des tendances sur les caractéristiques dites de consistances (Pénétration, A et B, Viscosité) au regard de leur comportement à long terme, cela principalement sur les liants récupérés après leur mise en œuvre et après 8 ans de mise en service. Les caractéristiques mesurées par les essais de traction directe à  $20\text{ °C}$ , retour élastique à  $25\text{ °C}$ , teneur en asphaltène, BBR, réalisés sur les bitumes prélevés après leur mise en œuvre montrent, de même, des tendances sur les liants récupérés après leur mise en oeuvre.
- d. Les corrélations issues des bitumes polymères, excepté les bitumes 8 et 9, ne confirment pas les tendances mise en évidence pour les bitumes purs. Notons que ces bitumes modifiés ne sont que faiblement fissurés, ainsi il n'est pas possible d'en dégager une corrélation absolue.
- e. L'analyse des bitumes avec ajouts ne permet pas d'avancer des conclusions de part leur représentativité limitée, en effet seul 3 bitumes composent cette famille de produit.
- f. Les essais de retrait thermique empêché réalisés sur les enrobés prélevés après la mise en œuvre mettent en évidence la bonne correspondance entre la température de transition de l'essai et la fissuration observée in situ après 10 ans.

## bibliographie

- (1) *Ancienne norme suisse SN 640 322, "Dimensionnement", 1971*
- (2) *Ancienne norme suisse SN 670 710b, "Gravillons et graviers concassés: prescription de qualité", 1972*
- (3) *Ancienne norme suisse SN 670 760, "Filler pour enrobés bitumineux: prescription de qualité", 1976*
- (4) *Ancienne norme suisse SN 640 431, "Tapis et couches de support hydrocarbonés à chaud: exécution, exigences", 1976*
- (5) *Norme suisse SN 640 431a, "Revêtements en béton bitumineux: conception, exigences, exécution", 1988*
- (6) *Ancienne Norme Suisse SN 640 925, "Relevé et évaluation de l'état des routes", août 1990*
- (7) *Norme Suisse SN 640 925a, "Relevé et évaluation de l'état des routes", avril 1997*
- (8) *Norme Suisse SN 640 521b, "Planéité, exigences de qualité", mai 1995*
- (9) *Norme Suisse SN 640 730b, "Entretien des chaussées", décembre 1998*
- (10) *Performance analysis of Road Infrastructure (PARIS) , final report, novembre 1998*
- (11) *Recherche OFROU, "Analyse des modèles de comportement des chaussées", en cours*
- (12) *Arand W., "Comportement des asphaltés à basses températures, développement et mise à l'épreuve d'une méthode d'essai", revue Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, n°407, 1984*
- (13) *Dumont A.-G., Huet M., Simond E., "Planches comparatives avec bitumes modifiés et ajouts", rapport OFR n° 113, octobre 1994*
- (14) *Dumont A.-G., Schwery B., Angst Ch., "Planches comparatives avec bitumes modifiés et ajouts", Congrès Eurobitume, Madrid octobre 1989*
- (15) *Dumont A.-G., Huet M., Simond E., "Viellissement de bitumes modifiés issus de planches comparatives réalisées en Suisse, dans le canton du Valais", Congrès Eurobitume, Stockholm juin 1993*
- (16) *Dumont A.-G., Pittet M., Pardon P., Pasquier M., "Etude de l'évolution de la microstructure des liants modifiés par microscopie optique d'épifluorescence UV", Congrès Eurobitume, Strasbourg mai 1996*
- (17) *Dumont A.-G., Schwery B., "Des liants modifiés au banc d'essai sur la N9 entre Riddes et Sion", revue VSS (Union des professionnels suisses de la route) Route et Trafic n°7, 1989*
- (18) *Dumont A.-G., Turtschy J.-C., Scazziga I., Pucci T., Fontana M., "Analyse des modèles de comportement des chaussées", mandat VSS 11/99, juillet 2001*
- (19) *Journée Technique LAVOC, "Nouvelles tendances pour les revêtements routiers", Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, septembre 2000*
- (20) *Jung D.H., Vinson Ted S., "Low temperature cracking: test selection", Strategic Highway Research Program SHRP-A-400 contract A-033A, Washington DC 1994*
- (21) *Monismith Carl L. & al., "Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete", Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologist (AAPT), vol. 34, 1965*
- (22) *Office Fédéral des Routes, Cantons de Neuchâtel et du Valais, Projet PMS NE-VS, Application VIAPMS®, décembre 1997*
- (23) *PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure), Transport research fourth framework, program road transport, Luxembourg, november 1998*
- (24) *Pucci T., "Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux", thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, octobre 2001*
- (25) *République et canton de Neuchâtel/Service des Ponts et Chaussées, Office des Routes cantonales, Développement d'un système de gestion pour le réseau des routes nationales, Rapport N°952404, septembre 1996*
- (26) *Schwery B., "Des liants modifiés au banc d'essai sur la N9 entre Riddes et Sion, rapport n° 1: état initial ", revue VSS Route et Trafic n°12, 1991*

- (27) Schwery B., Angst Ch., Aebersold S., "Comportement dans le temps des enrobés issus des planches comparatives réalisées en Suisse, dans le canton du Valais, avec différents bitumes polymères", Congrès Eurobitume, Stockholm juin 1993
- (28) Viaconsult AG, Vergleich der Zustandserfassung 1988/1991 mit dem ARAN-Gerät, Ergänzende Untersuchungen, Rapport du 1.11.1991 pour le Canton des Grisons
- (29) Viaconsult AG, Vergleich der Zustandserfassung 1988/1991 mit dem ARAN-Gerät, Ergänzende Untersuchungen II, Rapport du 6.1.1992 pour le Canton des Grisons
- (30) Vinson Ted S., Janoo V.C., Haas Ralph C.G., "Low temperature and thermal fatigue cracking", Summary Report SR-OSU-A-003A-89-1, Strategic Highway Research Program contract A-033A, 1989
- (31) Vinson Ted S., Kanerva H.K., Zeng H., "Low temperature cracking: field validation of the Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST)", Strategic Highway Research Program SHRP-A-401 contract A-033A, Washington DC 1994
- (32) OFR, Service des Routes Nationales du Canton du Valais, Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC) de l'EPFL, Sous-commission VSS 271/15: « Planches comparatives avec bitumes modifiés et ajouts », Rapport no 1 ; chaussée et liants, oct. 1994
- (33) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Fabienne Farcas: » Etude d'une méthode de simulation du vieillissement des bitumes sur route », sept. 1998 (Chaussée-CR21)
- (34) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Collectif du sous-groupe Qualité des bitumes: » Susceptibilité au vieillissement des bitumes », avril 1997 (Série chaussée-CR19)
- (35) J. Kister, N. Pieri, L. Germanaud: » Caractérisation chimique du vieillissement de bitumes par fluorescence UV en excitation-émission synchrones et IRTF », 5ème Congrès Eurobitume, juin 1993, Stockholm, contribution 1.05
- (36) N. Pieri, J.P. Planche, D. Martin, L. Germanaud, J. Kister: »A new approach to predict rheological properties of bitumens from their chemical composition determined by FTIR and synchronous U.V. Fluorescence », Congrès Eurasphalt & Eurobitume, Strasbourg, 1996, contribution 5.120
- (37) J.C. Petersen: »Quantitative Functional Group Analysis of Asphalts Using Differential Infrared Spectroscopy and Selective Chemical Reactions – Theory and Application », Transportation Research Record 1096
- (38) J. Wiertz, R. Degeimbre, Université de Liège: »Identification et dosage des Polymères SBS et APP dans les bitumes modifiés », Second International Symposium – Liège 1984: » Plastic and rubber waterproofing in civil engineering »